

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Antonio Margarin

Zagreb, 2018. godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Predrag Čosić, dipl. ing.

Student:

Antonio Margarin

Zagreb, 2018. godina.

Ovaj rad posvećujem heroju koji je sada najponosniji!

IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj završni rad izradio samostalno koristeći tijekom studija stečena znanja i vještine te služeći se navedenom literaturom.

Antonio Margarin

ZAHVALA

Zahvaljujem se prof. dr. sc. Predragu Ćosiću na ukazanom povjerenju, na svom izdvojenom vremenu te na mentorstvu prilikom pisanja ovog rada. Isto tako, zahvaljujem se na svoj ustupljenoj literaturi te na svim konstruktivnim i stručnim savjetima koji su mi udijeljeni za vrijeme pisanja diplomskog rada.

Veliku zahvalu upućujem svojim roditeljima, bratu, djevojci i prijateljima koji su mi kroz čitav studij bili velika podrška i motivacija. Hvala vam!

Jednako tako, zahvalu upućujem prof. dr. sc. Damiru Godecu bez čije pomoći ovaj rad ne bi bio moguć.

Hvala i asistentici Maji Trstenjak na stručnim i korisnim savjetima koji su mi udijeljeni prilikom pisanja diplomskog rada.

Jednako tako, veliko hvala upućujem tvrtki MARSi, a posebice gospodinu Mariu Šinku te gospodinu Maticu Vogrinu. Zahvaljujem se na ustupljenim materijalima i informacijama te na izrazitoj ljubaznosti i susretljivosti kroz čitav period naše suradnje.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa:	
Ur. broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **ANTONIO MARGARIN** Mat. br.: **0035193043**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Primjena višekriterijalnog optimiranja pri odabiru načina izrade zupčanika**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Implementation of multicriterion optimization in process of gear production**

Opis zadatka:

Cilj je odabrati najpovoljniji način izrade razmatranog zupčanika primjenom, višekriterijalnog optimiranja AHP metodom. Početni podaci čine crtež gotovog komada, dodatni zahtjevi, vrsta materijala i količina izradaka. Usporediti primjenu dvije varijante izrade: obradu odvajanjem čestica (OOC) i primjenu aditivnih tehnologija. Definirati granični broj komada za procjenu odabira vrste tehnologije: OOC ili aditivne tehnologije. Razmotriti moguće načine izrade obrade odvajanjem čestica. Definirati vrstu primarnog procesa, načine obrade, načine stezanja, redoslijed operacija, parametre obrade, alatne strojeve, alate. Proračunati vremena i troškove izrade.

Dati prikaz područja podrške odlučivanja (Decision Support Systems), mogućnosti, ograničenja i područja primjene.

Koristeći aditivne tehnologije, razmotriti moguće načine izrade zupčanika. Prikazati redoslijed aktivnosti u izradi aditivnim tehnologijama. Kreirati stablo kriterija i podkriterija te primjenom ponderiranja odrediti njihovu međusobnu važnost. Razmotriti konzistentnost kriterija te vrijednosno definirati kvalitativne i kvantitativne kriterije.

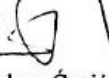
Opisati softversku aplikaciju Expert Choice, redoslijed rada, unos podataka, grafički prikaz rezultata. Na odabranom primjeru, analizirati polučene rezultate, razmotriti moguće scenarije različitog ponderiranja kriterija/podkriterija. Razmotriti mogućnost, uz realnu izradu aditivnom tehnologijom, procjene vremena i troška izrade. Dati prijedlog za daljnji rad na razmatranom primjeru.

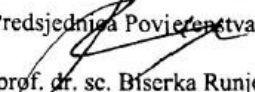
U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
03. svibnja 2018.

Rok predaje rada:
05. srpnja 2018.

Predviđeni datum obrane:
11. srpnja 2018.
12. srpnja 2018.
13. srpnja 2018.

Zadatak zadao:

prof. dr. sc. Predrag Čosić

Predsjednica Povjerenstva:

prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS KRATICA	V
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD.....	1
2. POJAM REINŽENJERINGA	2
3. ADITIVNE TEHNOLOGIJE	6
3.1. Povijesni razvoj aditivnih tehnologija.....	6
3.1.1. Stereolitografija – SL/SLA	6
3.1.2. Razvoj ostalih sustava aditivnih tehnologija i pojava 3D pisača	6
3.1.3. Uređaji i materijali nove generacije	8
3.2. Osnove aditivne slojevite proizvodnje	14
3.3. Pregled postupaka aditivne proizvodnje	16
3.4. Suvremeni zahtjevi tržišta i primjena aditivne proizvodnje na takvom tržištu.....	19
3.4.1. Suvremeni zahtjevi tržišta	19
3.4.2. Brzi razvoj proizvoda – Rapid Product Development RPD	21
4. POJAM PODRŠKE ODLUČIVANJU DSS	23
4.1. Povijest DSS-a	23
4.2. Vrste DSS-a.....	25
4.2.1. DSS zasnovan na modelu.....	25
4.2.2. DSS zasnovan na podacima	25
4.2.3. DSS zasnovan na komunikacijama	25
4.2.4. DSS zasnovan na dokumentima.....	26
4.2.5. DSS zasnovan na znanju	26
4.2.6. DSS zasnovan na WEB-u	26
5. METODE VIŠEKRITERIJALNOG ODLUČIVANJA	27
5.1. ELECTRE	29
5.2. TOPSIS	30
5.3. PROMETHEE.....	30
5.4. GREY THEORY.....	31
6. AHP METODA	32
6.1. Postupak provođenja AHP metode	33
6.1.1. Koraci u provođenju AHP metode.....	33
6.1.2. 0. faza: Strukturiranje problema.....	33
6.1.3. I i II. faza: Određivanje najznačajnijeg kriterija i alternative	34
6.1.4. III. faza: Određivanje konačnog rješenja	37
6.1.5. Konzistencija.....	37
6.2. Prednosti i nedostaci AHP metode	39

6.3. EXPERT CHOICE Ver. 11.5	40
6.3.1. Sučelje i strukturiranje problema	41
6.3.2. Prikaz rezultata.....	43
7. ODREĐIVANJE KRITERIJA I PRIPREMA PODATAKA ZA ODABIR VARIJANTE IZRADE.....	46
7.1. Osnovne informacije o proizvodu	46
7.1.1. Tehnološki proces izrade zupčanika klasičnim strojevima.....	47
7.1.2. Tehnološki proces izrade zupčanika CNC strojevima	48
7.2. 3D DMLS – aditivna tehnologija kojom se izrađuje zupčanik	50
7.3. Izrada zupčanika aditivnim tehnologijama	52
7.3.1. Tvrtka MARSi	52
7.3.2. Tehnološki proces izrade zupčanika DMLS tehnologijom.....	53
7.4. Teorijsko stablo odlučivanja	56
7.4.1. Obrazloženje kriterija i podkriterija teorijskog stabla.....	57
7.5. Modificirano stablo odlučivanja	63
7.6. Priprema podataka za odabir varijante izrade	65
8. PRIKAZ I ANALIZA REZULTATA ODABIRA TEHNOLOGIJE IZRADE	68
8.1. Postavljanje modela unutar softvera	68
8.1.1. Ponderiranje kriterija	69
8.1.2. Ponderiranje podkriterija	70
8.1.3. Procijena alternativa u odnosu na različite podkriterije.....	74
8.2. Rezultati i analiza rezultata	75
8.3. Potencijal aditivne proizvodnje – izrada šupljeg zupčanika	79
8.4. Usporeba dobivenih rješenja	84
9. ZAKLJUČAK.....	88
LITERATURA.....	89
PRILOZI.....	93

POPIS SLIKA

Slika 1. Procesi za vrijeme reinženjeringa	3
Slika 2. Slaganje 2D slojeva u 3D proizvod.....	14
Slika 3. Usporedba kriterija u proizvodnji od 1980 do 2010. godine	19
Slika 4. Utjecaj različitih čimbenika na gubitak dobiti	20
Slika 5. Mogućnost primjene aditivne proizvodnje	22
Slika 6. Hijerarhijski pregled metoda višekriterijalnog odlučivanja.....	28
Slika 7. Strukturiranje problema AHP metode.....	34
Slika 8. Saatyeva skala relativne važnosti.....	35
Slika 9. Opis vrijednosti sa Saatyeve skale	35
Slika 10. Matrica A	36
Slika 11. Matrica X	36
Slika 12. Konzistencija.....	38
Slika 13. Slučajni indeks konzistencije RI	38
Slika 14. Sučelje i strukturirani problem unutar Expert Choica 11.5	41
Slika 15. Numerička komparacija	42
Slika 16. Opisna komparacija.....	42
Slika 17. Grafička komparacija.....	42
Slika 18. Grafovi osjetljivosti.....	43
Slika 19. 2D graf osjetljivosti.....	44
Slika 20. Prikaz zupčanika kreiranog u Solidworks-u	46
Slika 21. Princip rada 3D printera.....	51
Slika 22. Kompleksni proizvodi izrađeni 3D DMLS-om.....	51
Slika 23. Teorijsko stablo odlučivanja	57
Slika 24. Modificirano stablo odlučivanjaPriprema podataka za odabir varijante izrade.....	64
Slika 25. Modificirano stablo unutar softvera Expert Choice	68
Slika 26. Težinski faktori kriterija unutar Expert Choica.....	70
Slika 27. Težine podkriterija unutar kriterija karakteristike izratka.....	71
Slika 28. "Težine "kriterija unutar podkriterija mehanička svojstva izratka	71
Slika 29. Težine podkriterija unutar kriterija troškovi	72
Slika 30. Težine podkriterija unutar kriterija vrijeme izrade	73
Slika 31. Prikaz dobivenih rezultata.....	75
Slika 32. Utjecaj kriterija na odabir alternative.....	76
Slika 33. <i>Performance</i> dijagram AHP metode.....	76
Slika 34. Gradijent dijagrami za sva četiri kriterija	77
Slika 35. 3D model „šupljeg“ zupčanika	80
Slika 36. Tlocrt „šupljeg“ zupčanika.....	80
Slika 37. Rezultati analize odabira tehnologije izrade „šupljeg“ zupčanika.....	81
Slika 38. Težine kriterija kod izrade „šupljeg“ zupčanika	82
Slika 39. <i>Performance</i> dijagram za „šuplji“ zupčanic	82
Slika 40. Težine podkriterija unutar kriterija karakteristike izratka.....	83
Slika 41. Gradijent dijagrami prikazani za „šuplji“ zupčanic.....	84

POPIS TABLICA

Tablica 3.1. Kronologija pojavljivanja uređaja i materijala novih generacija	8
Tablica 3.2. Postupci aditivne proizvodnje	16
Tablica 7.1. Redoslijed operacija izrade zupčanika – klasični strojevi.....	47
Tablica 7.2. Redoslijed operacija izrade zupčanika – CNC	49
Tablica 7.3. Redoslijed operacija izrade zupčanika - 3D printanje.....	53
Tablica 7.4. Dio proizvodnje za koji su pripremani podaci	65
Tablica 7.5 Pripremljeni podaci za odabiti varijante izrade	67
Tablica 8.1 Prednosti i mane kod izrade zupčanika objema tehnologijama	86

POPIS KRATICA

Oznaka	Puni naziv	Značenje
AHP	Analytic Hierarchy Process	Spada u najpoznatije i posljednjih godina najviše korištene metode za odlučivanje kada se proces odlučivanja, odnosno izbor neke od raspoloživih alternativa ili njihovo rangiranje, temelji na više atributa koji imaju različitu važnost i koji se izražavaju pomoću različitih skala.
BPR	Business Procces Reengineering	Izraz koji se danas često koristi u suvremenoj literaturi unutar područja rukovođenja i organizacije te u općenitoj komunikaciju među poslovnim ljudima
CAD	Computer- Aided Design	Program koji koristi kompjutersku grafiku za razvoj, analizu i izmjene tijekom postupka oblikovanja proizvoda
CAE	Computer- Aided Engineering	Interaktivni grafički softver koji služi za sofisticirano, interaktivno rješavanje inženjerskih problema.
CAM	Computer Aided Manufacturing	Računalom podržana priprema za proizvodnju koja obuhvata prevoćenje projektnih informacija u tehnološke informacije i proizvodnju s različitim razinama automatizacije.
ERP	Enterprise Resource Planning	Softverski paket poslovnih aplikacija kojem je cilj integrirati sve poslovne procese i odjele u kompaniji u jedinstveni,transparentni poslovni kompjutorski sustav sa jedinstvenom bazom podataka.
FDM	Fused Deposition Modeling	Postupak očvršćivanja taloženjem
LCA	Life Cycle Assessment	Procjena emisije štetnih tvari tijekom životnog cilusa proizvoda
PDM	Product Data Management	Sustav za upravljanje podacima o proizvodu - Alat koji pomaže inženjerima i drugima uključenim u razvoj proizvoda, u upravljanju podacima o proizvodu te upravljanju razvojnim procesom proizvoda. PDM sustavi nastoje pratiti gomile podataka i informacija potrebnih za dizajn, proizvodnju ili izgradnju, potom i podržati i održavati proizvod.
PLM	Product Lifecycle Management	Upravljanje životnim ciklusom proizvoda- sveobuhvatan pristup u razvoju novih proizvoda i upravljanju informacijama o proizvodu od početne ideje do njegovog zbrinjavanja.
RPD	Rapid Product Develompent	brzi razvoj proizvoda pristup je koji nastoji ubrzati proces razvoja nekog proizvoda, a sve s ciljem minimiziranja vremena od ideje o proizvodu do njegova izlaska na tržište
SLA	Stereolitografija	Postupak očvršćivanja kapljevitor fotopolimera osjetljivog na djelovanje ultraljubičastog zračenja u tankim slojevima s pomoću lasera
SLS	Selective Laser Sintering	Postuka kod kojeg se toplina laserskog zračenja rabi za taljenje praškastih materijala

STL	Standard Tessellation Language	Datoteka koja predmet pokazuje kao mrežu povezanih trokut, čini osnovu za rezanje u slojeve, na čemu se temelje Additive Manufacturing postupci
------------	--------------------------------------	---

SAŽETAK

Unutar ovog diplomskog rada formirano je stablo kriterija koje, koristeći AHP metodu, ima za cilj odrediti tehnologiju izrade. AHP metoda provodi se unutar softvera Expert Choice, a kao alternative pojavljuju se konvencionalne i aditivne tehnologije.

Proizvod za koji je vršen odabir varijante izrade zupčanik je složenog oblika. Na temelju podataka o vremenima izrade, troškovima izrade, te različitim karakteristikama proizvoda provedena je AHP metoda, analizirani su i komentirani dobiveni rezultati. Jednako tako, napravljena je i „*what-if*“ analiza kako bi se moglo promatrati što se događa s promjenom važnosti kriterija.

Nadalje, kroz ovaj diplomski rad objašnjen je pojam reinženjeringa, pojam višekriterijalnog odlučivanja, objašnjena je AHP metoda te je dan kratki uvid u osnove rada softvera Expert Choice.

Jednako tako, čitatelja se upoznaje s aditivnim tehnologijama, kronološki je prikazan njihov povijesni razvoj, istaknuti su najbitniji povijesni događaji vezani uz aditivnu proizvodnju te je dan popis postojećih postupaka aditivne proizvodnje.

Ključne riječi: AHP metoda, aditivna proizvodnja, višekriterijalno odlučivanje, Expert Choice

SUMMARY

In this graduate thesis the criteria tree which aims to determine the technology of production was formed. That tree was base for AHP method which was implemented through software Expert Choice. Conventional and additive technologies were set as alternatives.

The product which was the target of determination of technology of production was complex shaped gear. Based on data of production time, production costs and various product characteristics, AHP method was performed, the results were analyzed and commented. Likewise, the „what-if“ analysis has been made so that we can observe what is going on with if the importance of criteria was changed.

Furthermore, the terms of reengineering, multi-criteria decision making and AHP method have been explained. Special attention is dedicated to Expert Choice for which are given the basics of working.

Also, the reader is introduced to additive technologies, their historical development is chronologically presented, the most important historical events related to additive production are highlighted and a list of existing additive production methods are presented.

Key words: AHP method, additive manufacturing, multi-criteria decision making, Expert Choice

1. UVOD

Suvremeno tržište postavlja sve veće i strože zahtjeve na razvojne procese i proizvodnju. Od proizvođača se očekuje da budu kvalitetni, fleksibilni i cjenovno prihvatljivi potrošačima. Te činjenice pred proizvođače postavljaju nove izazove te od proizvođača traže da idu u korak s vremenom i tehnologijom.

Jedna od tehnologija koja se intenzivno pojavljuje u zadnjih desetak godina je aditivna proizvodnja. Aditivna proizvodnja, poznatija pod pojmom 3D printanje, svoje korijene vuče tridesetak godina unazad, a tek se u zadnjih nekoliko počinje intenzivnije koristiti. Takva tehnologija izrade proizvođačima omogućuje proizvodnju točno onog što kupac od njih traži. Omogućuje im personalizaciju proizvoda, fleksibilnost prilikom izrade te na taj način pruža zadovoljstvo kupcu. Ono što je za kupca vrlo bitno, a to su kvaliteta izratka, cijena izratka i rok isporuke, su stvari na kojima se „lome koplja“. Znati balansirati sa takvim stvarima čini proizvođača uspješnim. Aditivne tehnologije pružaju jedan novi pogled na proizvodnju, omogućuju formiranje oblika koje je nemoguće dobiti klasičnim tehnologijama stoga postaju sve interesantnije proizvođačima, ali i kupcima.

Cilj diplomskog rada je odrediti stablo kriterija pomoću kojeg će se odlučiti kojom tehnologijom izrade, s obzirom na različite kriterije i podkriterije, će se određeni proizvod izrađivati. Takva odluka biti će donešena pomoću AHP metode implementirane unutar software-a Expert Choice. Kako su aditivne tehnologije sve više prisutne te se intenzivno razvijaju strojevi i materijali tako se i zahtjevi na tržištu polako mijenjaju. Odluke kako, kada i kojom tehnologijom izrađivati biti će sve teže donositi stoga će nužno biti razviti algoritam koji bi mogao čovjeku olakšati donošenje odluka. Stablo koje će se pokušati razviti kroz ovaj diplomski rad moglo bi biti dobra početna točka za razvijanje stabla za profesionalnu primjenu te bi u budućnosti moglo služiti kao kvalitetna podrška prilikom donošenja ključnih proizvodnih odluka.

2. POJAM REINŽENJERINGA

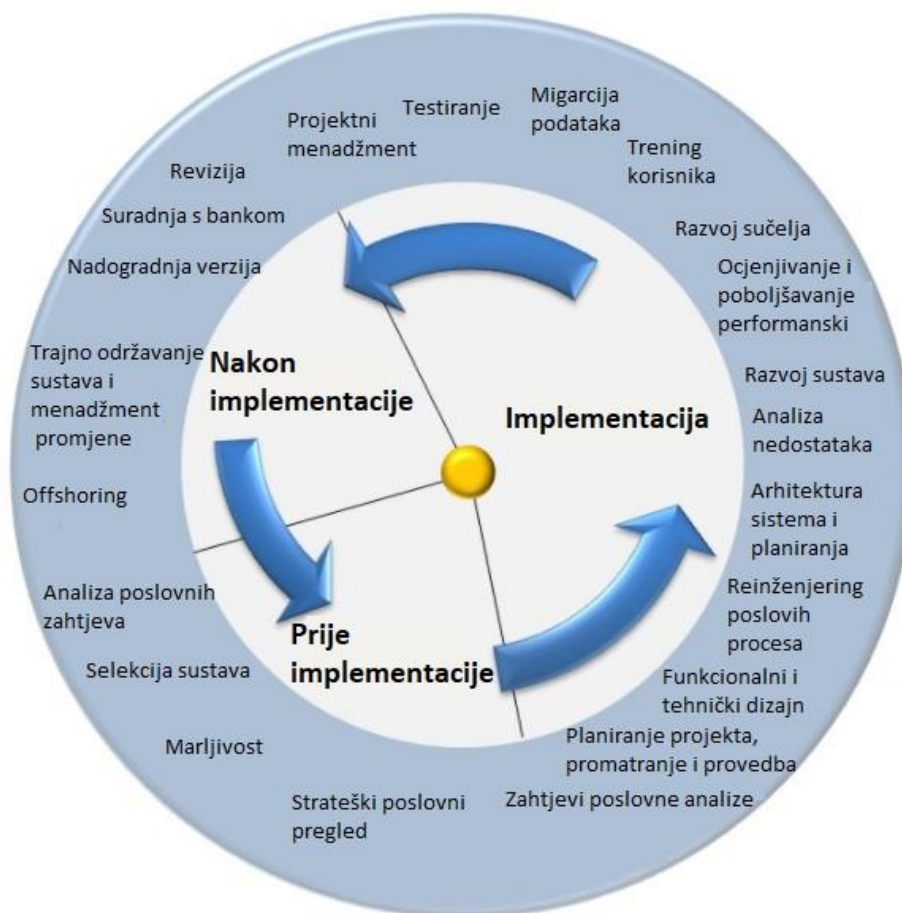
Reinženjering poslovnih procesa (eng. Business Process Reengineering – BPR) je izraz koji se danas često koristi u suvremenoj literaturi unutar područja rukovođenja i organizacije te u općenitoj komunikaciju među poslovnim ljudima. Tim pojmom obuhvaćeni su modeli za kompleksnu reorganizaciju procesa ili poslovanja. [1] Aditivne tehnologije omogućuju totalno novi pristup proizvodnji te mogu zahtijevati reorganizaciju i procesa i poslovanja te je stoga ovaj pojam bitan u kontekstu ovog diplomskog rada.

Reinženjering predstavlja proces radikalne promjene ili transformacije a usmjeren je na preispitivanje svakog procesa u organizaciji. Ima za cilj na kreativan i inovativan način promijeniti organizacijsku strukturu, stvoriti nove procese i sisteme, nove strukture i nove načine za provođenje promjena a sve kako bi se na taj način utjecalo na uspjeh kompanije.

BPR je veoma važan menadžerski koncept nastao između sredine 1980-ih i 1990-ih godina. Osmislili su ga Michael Hammer, profesor na MIT-u, te Thomas Davenport sa Babson koledža. [2]

Prije nego pristupimo bilo kojem poslu, moramo definirati ciljeve koje želimo postići. Opći ciljevi organizacije su: opstanak, razvoj, brzo prilagođavanje kupcima i dobavljačima, konkurentnost i motiviranost i na kraju, ali i na početku odgovarajuća kvaliteta proizvoda ili usluge namijenjene korisniku. Reinženjering čini drastične promjene u povećanju kvaliteta i smanjenju troškova, smanjuje i vrijeme izvršenja procesa, poboljšava unutarnje i vanjske odnose, eliminira nepotrebne aktivnosti, omogućava ugodnu atmosferu za rad i definira široku odgovornost zaposlenih. [1]

Neki od koraka koje je potrebno učiniti prije, za vrijeme i nakon implementacije reinženjeringa prikazani su na slici 1.



Slika 1. Procesi za vrijeme reinženjeringa [1]

Neka od temeljnih pitanja koje si tvrtke postavljaju prije nego se uhvate u koštac sa reinženjeringom su [3]:

- 1) Tko su naši korisnici? Kaku vrijednost mi njima pružamo?
- 2) Da li trenutni procesi donose očekivanu vrijednost?
- 3) Da li procesi trebaju biti redefinirani ili redizajnirani?
- 4) Da li su procesi sinkronizirani sa našom dugoročnom misijom i ciljevima?
- 5) Kako vismo obradili trenutne procese da smo nova kompanija?

Ova pitanja usmjeravaju reinženjering kompanije, odgovaranjem na njih dobije se jasnija misija i ciljevi koji se žele postići reinženjeringom te se daje procjena da li se inženjering uopće potreban.

Godine 1993. Hammer i James Champy objavili su knjigu u kojoj su predložili sedam principa koji bi pridonijeli uspješnom reinženjeringu poslovnih procesa te postizanja

značajnih poboljšanja po pitanju kvalitete, vremena upravljanja, brzine procesa te profitabilnosti [4]:

- 1) Organizirajte se oko ishoda, a ne oko zadatka.
- 2) Identificirajte sve procese unutar organizacije i odredite ih prema redoslijedu hitnosti.
- 3) Integrirajte proces obrade informacija u pravi posao koji daje informacije.
- 4) Priuštite geografski raspršenje resurse kao da su centralizirani.
- 5) Povežite paralelne aktivnosti u tijeku rada umjesto da se integriraju samo njihovi rezultati.
- 6) Odredite točku odlučivanja na kojoj se obavlja rad te ugradite kontrolu unutar procesa
- 7) Snimite podatke i na izvoru.

Hammer u svom članku „Reengineering work: Don't Automate, Obliterate“ spominje kako reinženjering nitko ne želi, zbunjujuć je i remeti sve na što su ljudi naviknuti.

Tvrđi da je reinženjering moguće provesti jedino ako će top-menadžeri podržati napore i rad zaposlenih prilikom promjena. Kaže i da su samo dosljednost, te čak i mala doza fanatizma potrebne kako bi reinženjering bio kvalitetno provoden.

U skladu s činjenicom da je reinženjering težak i mukotrpan, Hammer i Davenport predlagali su da reinženjering provodi tim ljudi čije funkcije bi bile podijeljene u nekoliko skupina.

Skupine za rad na reinženjeringu [2]:

- *Voditelj tima* – izvršni direktor koji je predvidio i odredio potrebu za reinženjeringom. Vođa tima odgovoran je za imenovanje vlasnika procesa.
- *Vlasnik procesa* – viši voditelj zadužen za određene poslovne procese. Odgovoran je za sastavljanje tima za reinženjering procesa te za nadgledanje tog tima.
- *Tim za reinženjering* – skupina koja se sastoji od insajdera čiji je posao uključivanje procesa reinženjeringa i outsajdera na čije poslove neće utjecati promjene u procesima. Tim za reinženjering odgovoran je za analizu postojećeg procesa te za nadgledanje njezinog redizajna.
- *Upravni odbor* - grupa viših menadžera koji su zagovarali koncept reinženjeringa unutar organizacije te su postavili specifične ciljeve za poboljšanje performansi. Upravni odbor, koji vodi voditelj tima, odgovoran je za rješavanje sporova i pomaže vlasnicima procesa prilikom odlučivanja o konkurentnim prioritetima.

- *Reinženjer Czar* – individua koja je odgovorna za svakodnevnu koordinaciju svih aktivnih reinženjeringa. Odgovornost je da bude izvršitelj te da razvija tehnike i alate koje će organizacija koristiti priikom reinženjerskog procesa.

Ukoliko se ostvari pravilno funkcioniranje svih ljudi uključenih u reinženjering šanse sa uspješno obavljanje reinženjeringa se višestruko povećavaju.

Reinženjering je skup i težak, donosi radikalne promjene unutar tvrtki te je veoma bitno da njegova provedba donese uspjeh tvrtkama.

Uspjeti se može samo čvrstom voljom s kompletnim timom, primjenjujući metode koje su poznate i ne robujući im. Cjelokupan rad treba biti usmjeren na klijenta jer sam cilj reinženjeringa je zadovoljenje potrebe klijenta za proizvodima i uslugama [1].

Ključ uspjeha [1]:

- raditi brzo a ne oprezno – prije nego li reinženjering naiđe na otpor
- tolerirati rizik – tko ne riskira, ne profitira
- prihvatiti nesavršenost – upuštanjem u nepoznato činimo pogreške i učimo na njima
- ne treba prestati prerano, čim dođe do prvih rezultata ili poteškoća, upornost i strpljenje su bitni da bi se vidjeli rezultati.

Ukoliko reinženjering bude uspješno i kvalitetno proveden tvrtke na taj način često ostvaruju konkurentsku prednost koja je ključna za opstanak na tržištu.

3. ADITIVNE TEHNOLOGIJE

Aditivne tehnologije više nisu budućnost, one su sadašnjost. Danas proizvođač treba biti fleksibilan, treba znati i moći izrađivati proizvode točno onakve kakve kupac želi, unikatne. Aditivne tehnologije su način na koji je to moguće ostvariti. U ovom poglavlju reći će se nešto o njihovom povjesnom razdoblju, područjima primjene te će se dati uvid u postupke aditivne proizvodnje.

3.1. Povijesni razvoj aditivnih tehnologija [5]

U ovom potpoglavlju dati će se uvid u povijesni razvoj aditivne proizvodnje, odnosno slojevite proizvodnje, koji počinje 80-ih godina prošlog stoljeća pa sve kraja 2010. godine.

3.1.1. Stereolitografija – SL/SLA [6]

Razvoj aditivnih tehnologija započinje 1984. godine pojavom stereolitografije. Postupak je razvijen u SAD-u u tvrtki *3D Systems* i omogućavao je očvršćivanje kapljevito fotopolimera osjetljivog na djelovanje ultraljubičastog zračenja u tankim slojevima s pomoću lasera. Prvi sustav zvao se SLA-1, nakon njega došao je i SLA 250 te Viper SLA.

Godinu dana kasnije suradnja između tvrtki *3D System* i *Ciba-Geigy* rezultirala je komercijalizacijom prve generacija kapljevito fotopolimera na osnovi akrila. U istoj godini tvrtka *DuPont* je razvila svoj uređaj te fotopolimere za njega. Idućih nekoliko godina nekoliko je tvrtki izdavalo svoje inačice. Prednjačile su japanske tvrtke *NTT Data CMET* i *Sony/D-MEC*. Godine 1990. njemačka tvrtka *Electro Optical Systems* (EOS) razvila je svoj stereolitografski sustav *Stereos*, a tvrtka *Quadrax* svoj pod imenom *Mark 1000* koji je za očvršćivanje fotopolimera rabio djelovanje vidljivog spektra svjetla.

3.1.2. Razvoj ostalih sustava aditivnih tehnologija i pojava 3D pisača

Idućih nekoliko godina došlo je do masovnog razvijanja različitih postupaka aditivnih tehnologija. Godine 1991. komercijalizirana su čak tri nova postupka aditivne proizvodnje. Postupak očvršćivanja taloženjem (e. Fused Deposition Modeling – FDM) razvijen od tvrtke *Stratasys* (SAD) vrši se tako što je plastomerni materijal ekstrudira i nanosi pomoću mlaznice na željena mjesta po principu sloj-po-sloj te na taj način tvori proizvod.

Tonografski postupak (e. Solid Ground Curing – SGC) tvrtke *Cubital* (SAD) temelji se na uporabi kapljevitih polimera osjetljivih na UV zračenje. Čitav sloj proizvoda očvršćuje odjednom propuštanjem UV zrake kroz latentnu masku načinjenu s pomoću elektrostatičkog tonera na staklenoj ploči.

Kod postupla laminiranja (e. Laminated Object Manufacturing – LOM) američke tvrtke *Helysy* riječ je o povezivanju i rezanju materijala u obliku folija ili tankih ploča s pomoću računalno upravljaše laserske zrake.

Godine 1992. na tržištu se prvi put pojavio postupak selektivnog laserskog srašćivanja (e. Selective Laser Sintering – SLS) a kod njega se toplina laserskog zračenja rabi za taljenje praškastih materijala.

Godinu nakon, tvrtka *Solinger* iz SAD-a komercijalizirala je postupak za izradu ljuskastih proizvoda, nazvan Direct Shell Production Casting (DSCP). Postupak rabljen za taj postupak patentiran je na MIT-u (*Massachusetts Institute of Technology*), a temelji se na uporabi ink-jet uređaja pomoću kojeg se keramički prah nanosi na kapljevito vezivo čime se oblikuje jezgra za izradu dijelova kalupa za lijevanje.

Iste te godine tvrtke *3D System* i *Ciba* komercijalizirale su prve epoksidnu smolu namijenjenu za SL postupak.

Idućih nekoliko godina tvrtke uglavnom iz SAD-a, Europe i Japan bavile su se razvojem već postojećih aditivnih sustava i njihovom nadogradnjom.

Prvi 3D pisači pojavili su se 1996. godine kada je tvrtka *Stratasys* predstavila uređaj *Genysis* koji se temeljio na načelima ekstrudiranja, slično kao i FDM postupak. IMB Watson Research Center je razvijao aditivni proces za taj pisac.

Jednako tako tvrtka *3D System* na tržište je plasirala svoj prvi 3D pisac (*Actua 2100*) s ink-jet mehanizmom. Svoje modele izbacivale su i tvrtke *Z Corporation*, *Schroff Development*, *BPM Technology*, *Kinergy* itd. Tvrtka *BPM Technology* komercijalizirala je sustav za postupak balističkog oblikovanja (e. Ballistic Particle Manufacturing – BPM), a temeljio se na nanošenju voska s pomoću ink-jet glave pisaca. Godine 1997. tvrtka je odustala od tog projekta.

Tvrtka *AeroMet* iz SAD-a 1997. godine je razvila sustav za aditivnu proizvodnju s pomoću lasera dodavanjem čestica (e. Laser Additive Manufacturing – LAM) te se koristio laser visoke snage za izradu proizvoda od titanovih legura. Projekt je napušten 2005. godine.

Godine 1998. tvrtka *Optomec* (SAD) komercijalizirala je svoj postupak taloženja metalnog praha s pomoću lasera (e. Laser Engineered Net Shaping – LENS). Sustav je razvijen u *Sandia National Labs*.

Godinu nakon, njemačke tvrtke izbacile su još dva nova sustava. Tvrtka *Fockele&Schwarze* predstavila je sustav temeljen na selektivnom laserskom taljenju metalnog praha (e. Selective Laser Melting – SLM) a tvrtka *Roders* na tržište je plasirala postupak kontrolirane izrade metalnih dijelova (e. Controlled Metal Buildup – CMB), a oba dva sustava razvijena su na *Fraunhofer Institut fur Produktionstechnik und Automatisierung*.

3.1.3. Uređaji i materijali nove generacije

U ovom poglavlju biti će dana tablica s kronološkim rasporedom pojavljivanja strojeva, materijala i najbitnijih događaja kroz povijest razvoja 3D printera u razdoblju između 2000 i 2016. godine. U tablici su navedeni datum pojavljivanja stroja, ime stroja, tvrtka koja ga je izdala te postupak kojim se navedeni stroj bavi. Ovdje su navedeni strojevi, materijali i događaji za koje se procijenilo da su najvažniji, dok se više informacija o strojevima može naći u knjizi profesora Damira Godeca i Mladena Šercera „Aditivna proizvodnja“ [5] te u službenom izvješću „Wohler Report“ [6].

Tablica 3.1. Kronologija pojavljivanja uređaja i materijala novih generacija

Uređaji nove generacije				
Mjesec/godina	Ime stroja	Proizvođač	Zemlja	Informacije o pisacu
a				
2000. godina [5]	Quarda/najava	Objet Geometries	Izrael	PolyJet
	PatternMaster	Sanders Prototype	SAD	-
	-	Precision Optical Manufacturing	SAD	Izravno taloženje metala (Direct Metal Deposition – DOM)
	Z402C	Z Corporation	SAD	Prvi komercijalno dostupan višebojni 3D pisac na svijetu
	Prodigy	Stratasys	SAD	Proizvodnja ABS polimernih proizvoda uporabom FDM postupka
2001. godina	Beta verzija Quadra	Object Geometries	Izrael	PolyJet

2001. godina [5]	FSM titan serija	Stratasys	SAD	Izrada proizvoda od PC,ABS,i PC/ABS
	Perfactory	EnvisionTEC	Njemačka	DLP – Digital light processing
	Z810	Z Corporation	SAD	Proizvodi većih dimenzija
	QuadraTempo	Object Geometries	Izrael	-
	DirectSteel 20-V1	EOS	Njemačka	Novi materijal – prah na osnovi čelika
	EOSINT 380	EOS	Njemačka	Uređaj za lasersko srašćivanje
	-	RSP Tooling LLC	SAD	Razvila Rapid Solidification Process – RSP – naštrecavanje kapljevitoog metala na podlogu.
2002. godina [5]	Dimension	Stratasys	SAD	Ekstrudiranje ABS-a u slojevima
	M3 Linear	Concept Laser	SAD	Selektivno lasersko taljenje - SLM
	T66	Solidshape	-	Cijenovno prihvatljiva inačica ink-jeta
	Phenix 900	Phenix Systems	Francuska	Srašćivanje keramike i metala u čvrstoj fazi
2003. godina [5]	Zprinter 310	Z Corporation	SAD	Ink-jet pisač,zamjenio Z400
	T612	Solidshape	-	Izrada voštanih pramodela za precizno lijevanje
	InVision	3D Systems	-	Hibridni uređaj koji tiska i očvršćuje fotopolimer
	EOSINT M 270	EOS	Njemačka	Izravno lasersko srašćivanje metala - DMLS
	TrumaForm LF i TrumaForm DMD 505	Trumpf	Njemačka	Izrada metalnih proizvoda
2004. godina [5]	Tri varijante FDM Vintage	Stratasys	SAD	ABS i PC
	-	DSM Somos	-	Novi nanokompozitni materijali
	RX-1	Prometal	-	Mali uređaj za izradu metalnih proizvoda

	InVision HR	3D Systems	-	Pisač za draguljarsko tržište
	Formation	Solidica	-	Postupak ultrazvučnog učvršćivanja
	Viper HA	3D Systems	-	Industrija slušnih pomagala
	Vero FullCure800	Objet Geometries	-	Serijski neprozirni materijali u boji
2005. godina [5]	Spectrum Z510	Z Corporation	SAD	Prvi 3D pisac visoke razlučivosti
	InVision LD	Solidimension	Izrael	Izrada proizvoda laminiranjem PVC folija
	RedEye EPM – ured	Stratasys	SAD	Usluge izrade prototipova i slojevite proizvodnje
	S-Print	ProMetal	-	Srašćivanje pijeska
	SLM Realizer 100	MCP-HEK	Njemačka	Lasersko taljenje (mezo/mikro primjene)
2006. godina [5]	-	Speed Part/Sintermask	Švedska	Susastavi za srašćivanje čitavog sloja praha u jednom koraku
	Eden 250/Eden 300/350V	Objet Geometries	-	Predstavljeni uređaji nove generacije
	InVision DP	3D Systems	-	3D pisac i skener za dentalno tržište
	NanoTool, ProtoCast AF 19120	DSM Somos	-	Novi fotopolimerni materijali
	EOSINT M 270	EOS	Njemačka	Sustav za preradu kobalt-krom praškastog materijala
2007. godina [5]	Zprinter 450	Z Corporation	SAD	Prvi 3D pisac
	FDM 900MC / 400C	Stratasys	SAD	Obuhvaćaju širok raspon primjene zbog velikog broja raspoloživih materijala u različitim bojama
	Connex 500	Objet Geometries	-	Omogućuje miješanje materijala i izradu proizvoda, odnosno njegovih detalja s različitim svojstvima i u različitim bojama
2008. godina [5]	Z-650	Z Corporation	SAD	3D pisac u boji s automatskim uklanjanjem viška praha

				i komorom za ispuhivanje
	Alaris 30	Objet Geometries	-	Stolni 3D pisač, cjenovno prihvatljiv
	Araldite Digitalis	Huntsman Advanced Materials	-	Djelovanje mikroelektromehaničkog sustava, omogućuje skraćanje vremena proizvodnje
	iPro9000 i 9000XL	3D Systems	-	Proizvodi do 1,5m dužine
	ProJet CP 3000 i CPX 3000	3D Systems	-	Izrada proizvoda od voska
2009. godina [5]	Osnovana međunarodna komisija ASTM International Committee F42 za aditivne postupke proizvodnje – stvaranje normi i terminologije - Uvodi se pojam Aditivna proizvodnja, a napuštaju se nazivi poput Rapid Prototyping, Rapid Tooling, Rapid Manufacturing itd.			
	SLM 50	ReaLizer GmbH	Njemačka	Prvi stolni uređaj iz skupine za lasersko srašćivanje ili taljenje Proizvodi od nehrđajućeg čelika, alatnog čelika, kobalt-kroma i zlata
	-	Bits From Bytes	Engleska	Uređaj na otvorenom sustavu RepRap. Cijena prvi put ispod 1000€
	-	MakerBot Industries	SAD	Također uređaj na RepRap sustavu.
	Novi materijal za dentalnu medicinu DentaCast	Solidscape	-	-
2010. godina [5]	Zprinter 250	Z Corporation	SAD	Idelan predstavnik uredskih uređaja
	Objet 30	Objet Geometries	-	Prvi stolni 3D pisač koji omogućuje dobivanje proizvoda u rasponu od čvrstih do elastičnih područja
	S-Max	ProMetal	-	Izrada pješčanih modela za kalupe za miješanje, brzine do 108 000 cm ³ /h
2011. godina [6]	Axis 2.1 kit i Glider 3.0	BotMill(Boca Raton, Florida)	SAD	Sastavljeni, ekstruzijski RepRap strojevi
	Windform XT 2.0	CRP	Italija	Nova generacija karbonskog materijala s

2011. godina [6]		Technology		većom čvrstoćom i produljenjem
	VisiJet e-stone	3D Systems	SAD	Materijal za dentalnu primjenu
	-	-	-	3DSUG grupa korisnika opreme 3D Systema otvorila je svoja vrata korisnicima drugih tehnologija te su se preimenovali u additive Manufacturing Users Group (AMUG)
	-	-	-	Ove godine počinje snažni razvoj softvera (više u Wohlers Report [6])
	VeroClear	Objet	Izrael	Novi digitalni materijal sličan ABS-u koji je čist i proziran
	Aerosol Jet	Optomec	Novi Meksiko	Nova glava za 3D printanje elektronike, solarnih čelija i ekrana
	Objet260 Connex	Objet	Izrael	Printer za printanje malih volumena s mogućnošću printanje s više materijala
	PEEK implatanti	Kelyniam Global	SAD	Isporuca prilagođenog koštanog implatanta
	Solidoodle	Mcor Technologies	Irska	RepRap 3D printer za samo \$699
	RGD525	Objet	Izrael	Prvi visoko-temperaturni materijal
2012. godina [6]	MakerBot Replicator	MakerBot	SAD	Printer sa printanjem većih volumena koji ima dva ekstrudera te omogućuje printanje u različitim bojama
	Cube	3D Systems	SAD	Printer s wireless konekcijom
	-	BumpyPhoto	SAD	3D printanje photo reljefa u boji
	Stratasys i Objet najvaljuju moguće spajanje u Stratasys LTD			
	Objet30 Pro	Objet	Izrael	Mogućnost printanja sedam različitih Objet materijala
	3Z linija	Solidescape	-	Visoko precizni printeri za printanje voskom
	Abflex i ABStuff	Envisiontec	Njemačka	Novi ABS materijali

	-	Orgonovo Holdings i Autodest	SAD	Suradnja kako bi napravili prvi 3D softver za bioprintanje
2013. godina [6]	3Dent printer	Envisiontec	Njemačka	Printer za dentalno tržište
	Arcam Q10	Arcam	Švedska	Printeri za medicinske implatante
	NASA radi na slanju printera na Internacionalnu svemirsku postaju			
	Istjecanje FDM patentan dovelo je do pojave jeftinih strojeva za ekstruzijsko printanje			
	Pojavljuje se mogućnost kupovanja 3D printera po maloprodajama			
2014. godina [6]	Objet 500 Connex3	Stratasys	SAD i Izrael	Multi-materijalni printer s mogućnošću printanja više boja
	Osnivanje časopisa 3D printing and Additive Manufacturing			
	Vinci 1.0	XYZprinting	Taiwan	Potpuno sklopljeni printer za \$499
	-	Shapeways	SAD	Nude platinu i 19k zlaato kao materijale za 3D printanje
	Aerosol Jet 5x	Optomec	Novi Meksiko, SAD	5-osni printar za pritanje elektronike
	Precoous M080	EOS	UK	Printanje nakita i dijelova za satove
2015. godina [6]	Lulzbot Mini printer	Aleph Objects	SAD	Printer sa samonivelirajućim „krevetom“
	Hibrid CNC glodalice i aditivnog printera	Hermle	-	-
2016. godina [7]	ProX DMP 320	3D Systems	SAD	Visokoprecizni printer za direktno printanje metala
	Siemens investira 21,4 milijuna eura kako bi u Švedskoj otvorio prvu tvornicu koja se bavi 3D printanjem metala			
	3D bioprinteri printanju ljudske uši i mišiće			
	NASA šalje drugi printer u svemir			
	U Italiji se dogovara pritanje prvog 3D sela			
	J750	3D Systems	SAD	Printanje komada od više materijala u punoj boji odjednom
	Prusa i3 MK2 3D Printer	Josef Prusa	Češka	Niskobudžetni 3D RepRap 3D printer – danas jedan od najpopularnijih

	Alex Le Roux isprintao je 3D betonsku građevinu „Tiny House“ u kojoj je moguće živjeti za manje od 24h
	L'Oreal i Poietis pokušali su printati kosu
	Adidas je počeo printati tenisice za trčanje

U tablici 2.1. dani su samo neki od ključnih događaja vezanih za razvoj 3D printanja, odnosno aditivnih tehnologija. Može se ustvrditi veoma brz razvoj opreme i materijala za postupke aditivne proizvodnje. Ono čemu se dalje težilo, a teži se i dan danas je razvijanje novih materijala i kvaliteti proizvoda. Pri tome, manje se teži razvijanju sustava i postupaka. Cilj je omogućiti jeftiniju i jednostavniju aditivnu proizvodnju krajnjeg proizvoda, uz intenciju da proizvod bude dostupan svakomu.

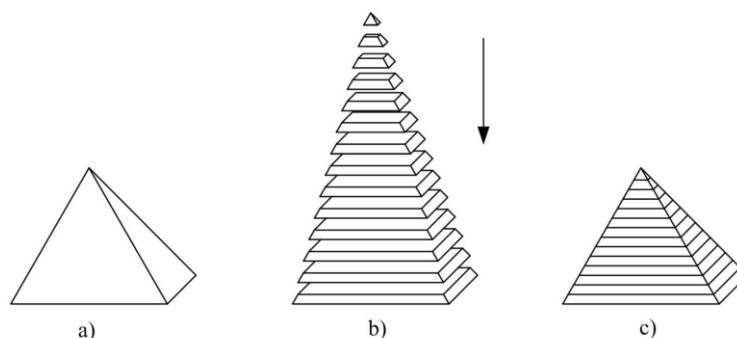
3.2. Osnove aditivne slojevite proizvodnje

Aditivna slojevita proizvodnja (eng. Additive Layered Manufacturing) malo je duži naziv za aditivnu proizvodnju, ali točno taj dodatak *slojevita* pobliže objašnjava sam princip proizvodnje.

Razlika između aditivnih i klasičnih tehnologija je u tome što se kod aditivnih materijal dodaje, dok se kod klasičnih materijal oduzima. Takav pristup koji polazi od činjenice da se dodaje koliko treba, a ne da se oduzima ono što ne treba, omogućuje uštede u materijalu te smanjuje potrošnju resursa.

Postupcima aditivne proizvodnje grade se vrlo komplicirani geometrijski 3D oblici proizvoda, ali sama tehnologija izrade temelji se na 2.5D postupcima koji se zapravo odnose na slaganje 2D slojeva jedan na drugi te se na taj način dobije treća dimenzija. [5]

Na slici 2. prikazano je slaganje 2D slojeva u 3D proizvod.



Slika 2. Slaganje 2D slojeva u 3D proizvod

Na slici 2. prikazan je način slaganja 2D slojeva u visinu, odnosno 3D model. Prvi prikaz na slici pokazuje izgled računalnog 3D modela proizvoda, drugi prikaz prikazuje način na koji se slažu slojevi jedan na drugi dok treći prikaz objašnjava kako izgleda slojeviti 3D proizvod.

Iako većina postupaka aditivne proizvodnje djeluje prema 2.5D načelima postoje postupci koje se može nazivati 3D postupcima u punom smislu riječi jer omogućuju dodavanje materijala u bilo kojoj izabranoj točki proizvoda. [5]

Prilikom izrade proizvoda aditivnim tehnologijama postoji nekoliko koraka [8]:

1. Izrada CAD modela proizvoda
2. Prebacivanje modela u STL datoteku
3. Prebacivanje datoteke na stroj za aditivnu proizvodnju
4. Podešavanje parametara stroja
5. Izrada proizvoda
6. Vađenje proizvoda
7. Naknadna obrada
8. Primjena

CAD model proizvoda može se dobiti na nekoliko načina: modeliranjem, reverzibilnim inženjerstvom te modeliranjem iz oblaka točaka. Kada se govori o modeliranju onda se prije svega misli na klasičan način povezan s 3D modeliranjem unutar CAD programa.

Reverzibilno inženjerstvo koristi kada se želi proizvoditi proizvod za koji se ne posjeduje dokumentacija nego postoji samo fizički model. Kada je takva situacija pristupa se snimanju postojećeg fizičkog objekta te reproduciranju njegove površine u trodimenzionalne podatke pa u zapis kojim se dalje upravlja CAD programom. [5]

Uređaji kojima se vrše snimanja mogu se dijeliti na pasivne i na aktivne. Kada se mjeri aktivnim uređajima kao rezultat 3D skeniranja dobije se oblak točaka koji opisuje geometriju mjerenog objekta. Kako bi se oblak točaka mogao pripremiti za generiranje CAD modela on mora proći faze registracije, uklanjanja šumova te smanjenja broja podataka. Komplekse proizvode nekada je potrebno skenirati iz više različitih uglova te razmatrane skenove na kraju povezati u jednu funkcionalnu cijelinu. [5]

3.3. Pregled postupaka aditivne proizvodnje [5]

Slijedeća tablica prikazuje popis postupka aditivne proizvodnje koji služe za proizvodnju polimernih proizvoda te postupka koji se koriste za proizvodnju alata i metalnih proizvoda.

Tablica 3.2. Postupci aditivne proizvodnje [5]

POSTUPCI ADITIVNE PROIZVODNJE	
Postupci aditivne proizvodnje polimernih proizvoda	
Stereolitografija (e. Stereolithography – SL)	Postupci koji se temelje na načelima stereolitografije
	Tonografski postupak (e. Solid Ground Curing – SCG)
	Tonografski postupak (e. Solid Ground Curing – SCG)
	Stereolitografija Prefactory
	Stereolitografija Digital Wax
	Stereolitografski prijenos slike na film
	Mikrosvjetlosno očvršćivanje
	Mammoth stereolitografija
	Hibridni postupak 3D tiskanja i stereolitografije
	Hibridni postupak ekstrudiranja i stereolitografije
	Mikrostereolitografija
	Stereolitografija pastoznih materijala
Selektivno lasersko srašćivanje (e. Selective Laser Sintering – SLS)	Postupci koji se temelje na načelima selektivnog laserskog srašćivanja
	Selektivno lasersko srašćivanje
	Selektivno lasersko srašćivanje s pomoću maske (e. Selective Mask Sintering – SMS)

	Selektivno lasersko srašćivanje s pomoću halogenog svjetla
3D tiskanje (e. 3D Printing – 3DP)	Postupci koji se temelje na načelima 3D tiskanja
	Trodimenzijsko tiskanje (3DP)
	Hibridni postupak srašćivanja i 3D tiskanja (e. Selective Heat Sintering – SHS)
Postupci aditivne tehnologije temeljeni na ekstrudiranju	Postupci koji se temelje na načelima aditivnih tehnologija temeljenim na ekstrudiranju
	Taložno očvršćivanje (e. Fused Deposition Modeling – FDM)
	Multijet Modeling
	Višefazno mlazno očvršćivanje (e. Multiphase Jet Solidification – MJP)
	3D tiskanje polimernih voštanih proizvoda
Slojevita izrada laminiranjem (e. Layer Laminate Manufacturing – LLM)	Postupci koji se temelje na načelima slojevite izrade laminiranjem
	Izrada objekata laminiranjem (e. Laminated Object Manufacturing – LOM)
	Laminiranje – Kira (e. Selective Adhesive and Hot Press Process – SAHP)
Trodimenzijsko taloženje materijala u obliku aerosola (e. Maskless Mesoscale Materials Deposition – M ³ D)	-
Postupci aditivne proizvodnje alata i metalnih proizvoda	
Posredni postupci proizvodnje kalupa i metalnih proizvoda	Proizvodnja silikonskih kalupa (RTV kalupi)
	Proizvodnja kalupa od smjese epoksidne

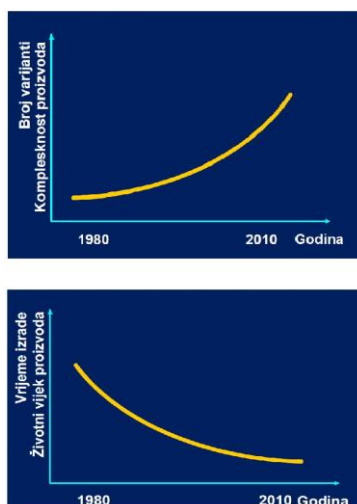
	smole i metala (e. Metal Filled Epoxy Tooling – MFET)
	Izrada kalupa naštrecavanjem metala (e. Spray Metal Tooling – SMT)
	Postupak EcoTool
	Postupak 3D Keltool
Izravna aditivna proizvodnja kalupa i metalnih proizvoda	Izravna proizvodnja epoksidnih dijelova kalupa (e. Direct ACES IM – AIM)
	Izravna izrada kalupne ljuske (e. Direct Shell Production Casting – DSPC)
	Selektivno lasersko srašćivanje metala (SLS)
	Selektivno lasersko taljenje (e. Selective Laser Melting – SLM)
	3D tiskanje metala
	Kontrolirana izrada metalnih proizvoda (e. Controlled Metal Build-up – CMB)
	Izravno taloženje metala (e. Laser Engineering Net Shaping – LENS)
	Izravno taloženje metalnog praha (e. Direct Metal Deposition– DMD)
	Taljenje pomoću snopa elektrona (e. Electron Beam Melting)
	Laminiranje
	Lasersko laminiranje i rezanje kalupnih šupljina (e. Laser Laminated Cut Cavities – LLCC)
	Višefazno mlazno očvrćivanje (e. Multiphase Jet Solidification – MJS)
	Brzo očvrćivanje (e. Rapid Solidification Process – RSP)

Ujednačeno temperiranje kalupa (e. Conformal Cooling)	-
---	---

3.4. Suvremeni zahtjevi tržišta i primjena aditivne proizvodnje na takvom tržištu

3.4.1. Suvremeni zahtjevi tržišta

Suvremeni zahtjevi tržišta su vrlo visoki. Teži se proizvodnji visokokvalitetnih proizvoda u što kraćem vremenu, sa ciljem što nižih troškova. [5] Nekada se proizvodilo masovno, što sličniji proizvodi bez personalizacije. Danas marketing želi drugačiju priču. Filozofija današnjih proizvođača okrenula se kupcima, odnosno svaki proizvođač želi korisniku omogućiti točno onakav proizvod kakav kupac želi. Želi izraditi kvalitetan personalizirani proizvod za svakog kupca.



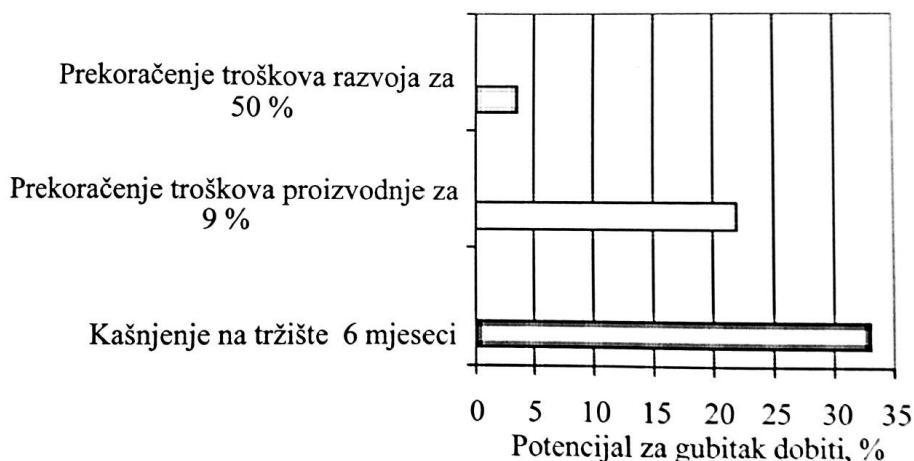
Slika 3. Usporedba kriterija u proizvodnji od 1980 do 2010. godine [9]

Ako se usporede grafovi sa slike 3 moguće je vidjeti kako se u zadnjih 30 godina poslovna filozofija počela mijenjati. Broj varijanti i kompleksnost proizvoda su u porastu, dok je krivulja vremena izrade proizvoda te njegovog životni vijeka u padu. To samo potvrđuje gore navedene činjenice o zahtjevima suvremenog tržišta.

Ono što je isto tako vrlo bitno, je činjenica da se proizvodi razvijaju i proizvode relativno brzo jer to zahtijeva tržište. Ukoliko tvrtka gubi previše vremena na razvoj ili proizvodnju nekog proizvoda vrlo se lako može dogoditi da zakasni u izlasku na tržište te time bude izložena financijskim gubitcima što može rezultirati ugrožavanjem budućnosti tvrtke.

Ako se pogleda slika 4 može se uočiti da kašnjenje sa izlaskom na tržište od 6 mjeseci, pri čemu se procijenjuje da je vijek trajanja proizvoda 5 godina, ima gotovo deset puta veći utjecaj na pojavu gubitaka dobiti negoli povišenje troškova razvoja proizvoda za čak 50%. Time se želi reći da nije dovoljno samo donositi ispravne odluke, već donositi odluke što je prije moguće.

Utjecaj različitih čimbenika na gubitak dobiti prikazan je na slici 4.



Slika 4. Utjecaj različitih čimbenika na gubitak dobiti [5]

Ono što je vrlo važno znati je činjenica da akumulirani troškovi u raznim fazama razvoja proizvoda nisu veliki, ali mogu bitno utjecati na ukupne kasnije troškove razvoja i proizvodnje, a što se očituje kroz gubitak potencijalne dobiti. To bi značilo se maksimalna dobit može ostvariti minimiziranjem vremena razvoja proizvoda, a ne minimiziranjem troškova razvoja. [5]

Glavne prednosti ranijeg izlaska proizvoda na tržište, prema A. Nortonu, su: [10]

- Prednost pred konkurencijom koja sporije izlazi na tržište
- Prednost u definiranju cijene proizvoda prije konkurencije
- Brži povrat uložених sredstava u razvoj proizvoda (manji financijski rizik)
- Potencijalno dulji vijek proizvoda na tržištu u usporedbi s konkurencijom
- Potencijalno veća ostvareba dobit od prodaje proizvoda .

Ono što je jedan od mogućih odgovora na ovakve zahtjeve tržišta je proizvodna filozofija obuhvaćena pojavom pristupa *brze proizvodnje* obuhvaćenog unutar koncepta brzog razvoja proizvoda (e. Rapid Product Development – RPD). [10]

3.4.2. *Brzi razvoj proizvoda – Rapid Product Development RPD [5]*

Rapid Product Development ili brzi razvoj proizvoda pristup je koji nastoji ubrzati proces razvoja nekog proizvoda, a sve s ciljem minimiziranja vremena od ideje o proizvodu do njegova izlaska na tržište. Ono što RPD pristup obuhvaća ponajprije su primjena i konstruiranje pomoću računala (CAD,CAM,CAE), istodobno inženjerstvo te primjena postupaka aditivne tehnologije i reverzibilnog inženjerstva.

Ideja RPD-a je da se u vrlo kratkom periodu dođe do gotovog proizvoda.

Aditivnu proizvodnju, kao dio RPD pristupa, moguće je ostvariti na tri načina:

1. Postupak brze proizvodnje prototipova (e. Rapid Prototyping – RP)
2. Postupak brze proizvodnje alata i kalupa (e. Rapid Tooling – RT)
3. Postupak brze (izravne) proizvodnje (e. Rapid Manufacturing – RM)

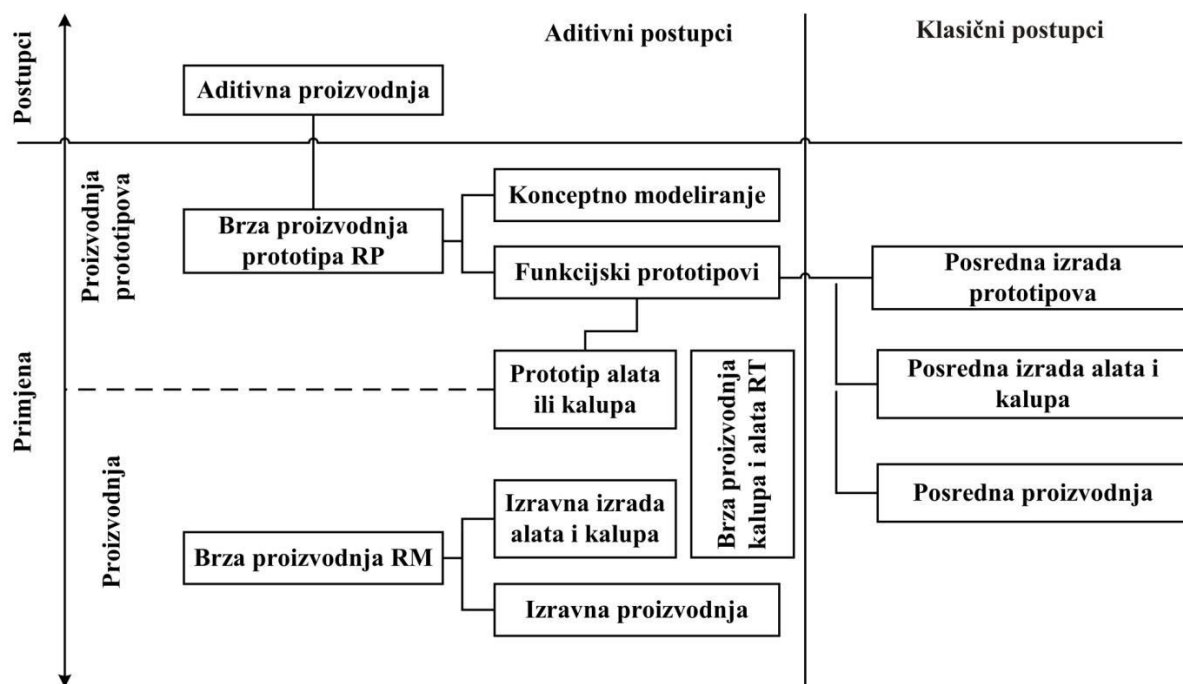
Ti postupci omogućuju izradu vrlo kompliciranih oblika izravno iz računalnih podataka u vrlo kratkom vremenu s pomoću automatiziranih procesa (najčešće). Materijal se gradi sloj po sloj, jedan na drugi i to se naziva aditivna (generativna) gradnja proizvoda. Ono što je važno, da riječ brzo ima relativno značenje. Ponekad se proizvod izrađuje nekoliko minuta, a nekad i po nekoliko dana, ovisno o različitim faktorima. No, unatoč tomu, uvriježilo se u praksi da se pod terminom brza proizvodnja bez preispitivanja zna o čemu i kojoj tehnologiji se radi.

Kad govorimo o pojmu *brze proizvodnje prototipova (RP)* onda govorimo o skupini postupaka koji služe za proizvodnju modela i prototipova koji mogu oponašati oblik (geometriju), materijal i funkciju budućih proizvoda. [5]

Pod postupkom *brze proizvodnje alata i kalupa (RT)* podrazumijeva se proizvodnja alata i kalupa ili njihovih najkompliciranijih dijelova za proizvodnju prototipnih ili probnih serija proizvoda uporabom istog procesa proizvodnje kojim će se proizvoditi konačni proizvod. Moguće je rabiti jedan ili više postupaka brze proizvodnje prototipova, a u čitavom se procesu mogu kombinirati i klasični postupci izrade alata i kalupa. [5]

Brza (izravna) proizvodnja (RM) podrazumijeva primjenu postupaka aditivne tehnologije proizvodnje za proizvod koji će se primijeniti kao i proizvod načinjen u serijskoj proizvodnji.

Ovaj segment proizvodnje je dosta ograničen, najprije zbog raspoloživosti materijala, ali konstatno s radi na novim materijalima koji bi mogli pridonijeti većoj upotrebi aditivnih tehnologija u proizvodnji. [5]



Slika 5. Mogućnost primjene aditivne proizvodnje [5]

Slika 5. prikazuje mogućnosti primjene aditivne proizvodnje u različite svrhe.

4. POJAM PODRŠKE ODLUČIVANJU DSS

Donositi odluke nije jednostavno. Svaki dan se susrećemo sa raznim situacijama u kojima treba donositi odluke i to nam zna stvarati probleme. Odlučiti da li ćemo kupiti bijeli ili crni kruh, ili da li ćemo voziti zeleni ili žuti auto nije neka odluka od životne važnosti, ili barem nebi trebala biti. Takve odluke donesemo i ne brinemo o posljedicama. Ali postoje i odluke koje mogu biti od vrlo velike važnosti.

Donošenje odluke koje su povezane sa situacijama iz svakodnevnog ili poslovnog okruženja poput izbora strategije tvrtke, tehničkog rješenja, mjesta, visine i dinamike ulaganja ovise o velikom broju međusobno povezanih i često potpuno konfliktnih kriterija. Problem se javlja kako ispravno procijeniti važnost tih kriterija, kako izvesti sustav prioriteta koji može dovesti do dobre odluke o izboru najbolje alternative. [11]

Kod takvih situacija pojavljuju se DSS (eng. Decision Support System) računalni programi koji se koriste kao pomoć pri odlučivanju na bilo kojoj razini upravljanja; s naglaskom na odlučivanju kod slabostrukturiranih i nestrukturiranih zadataka. DSS je računalni sustav za organizaciju informacija, identifikaciju i dohvat informacija, analizu i transformaciju informacija, izbor modela odlučivanja i analizu dobivenih rezultata. Usmjeren je rješavanju dobro strukturiranih i slabostrukturiranih problema, na sadašnje i buduće odluke, na kontrolu i planiranje. Mora omogućavati fleksibilnost i odlučivanju i implementaciji odluka. Odluke u kojima će se koristiti mogu biti jednostavne i vrlo složene. [12]

Podrška odlučivanju potrebna je i kod odabira tehnologije izrade. Ponekad je čovjeku teško odlučiti kako nešto proizvoditi, a kada i odluči vrlo lako se može dogoditi da to nije bilo najsretnije rješenje. U novije vrijeme, pojavom novih tehnologija poput aditivne, takve odluku postaju sve kompliciranije te je s te strane podrška odlučivanju vrlo bitna.

4.1. Povijest DSS-a

Prvi sustavi koji su služili za potporu odlučivanju prisutni su već duži niz godina. Počeli su se razvijati krajem šezdesetih godina prošlog stoljeća, a sama se implementacija dogodila sredinom osamdesetih. Provtne implementacije završavaju sredinom devedesetih, implementacijom DSS-a zasnovanog na webu.

Sustavi su razvijani paralelno s razvojem računala i opreme te prve ideje o nima datiraju iz 1965. godine kada se pojavljuju prvi zapisi o idejama, ljudima, sustavima te tehnologijama vezanima uz ove sustave.

U to je vrijeme IBM razvio sustav „360“ i omogućio praktičniji i jeftiniji razvoj menadžerskih informacijskih sustava (eng. Management Information Systems – MIS) u velikim kompanijama. Sustav je omogućio menadžmentu strukturirane i periodične izvještaje. [13]

Također, bile su dostupne mnoge informacije iz računovodskih i financijskih sustava.

Pioniri DSS-a, Peter Keen i Charles Stabell tvrde da se koncept za donošenje odluka razvio iz teoretskih razmatranja na *Cairnegie* institutu za tehnologiju i tehničkog rada na interaktivnim kompjuterskim sustavima, najviše provedenih na MIT-u šezdesetih godina.

Povijesna prekretnicom smatra se disertacija Scotta Mortona koja je obuhvatila izgradnju, implementaciju te testiranje interaktivnog sustava upravljanja. Student Andrew McCosh tvrdio je da je koncept sustava za podršku odlučivanju prvi dao Scott Morton u veljači 1964. godine u podrumskom uredu Harvard poslovne škole za vrijeme njihove rasprave o Mortonovoj disertaciji. Tijekom 1966. Scott Morton istraživao je kako računala i analitički modeli mogu pomoći menadžerima napraviti ponavljajuću ključnu poslovnu odluku. Proveo je eksperiment u kojem menadžeri zapravo koriste Upravljački sustav za odlučivanje (Management Decision System - MDS) u koordiniranju planiranja proizvodnje opreme za praonice. [14]

Početkom 70-tih godina objavljen je niz članaka iz područja potpore odlučivanju. U članku autora Gorrya i Scotta Mortona objavljenom u časopisu „Sloan Management Review“ 1971. godine po prvi put se pojavljuje pojam Decision Support System. U istom časopisu 1971. godine objavljen je rad autora T. P. Gerritya „The Design of Man-Machine Decision Systems: An application to Portfolio Management“. U tom članku Gerrity je ostvario sustav za potporu donošenja odluka kod ulaganju dionica te upravljanju portfolijom dionica.

Godine 1975. John D. C. Little s instituta Massachusetts Institute of Technology razvio je sustav Brandaid. Sustav je bio namijenjen potpori donošenju odluka u proizvodnji, promociji, oglašavanju i definiranju cijena proizvoda. Osim toga, Little je definirao četiri kriterija sustava za potporu odlučivanju robusnost, potpunost relevantnih detalja te jednostavnost korištenja i upravljanje. Kriteriji se koriste i prilikom ocijenjivanja suvremenih sustava. [15]

Autori R. Bonczek, C. Holsapple i A. Whinston 1981. godine definirali su teoretsku arhitekturu sustava za potporu odlučivanju. Arhitektura se prema njima sastoji od četiri općenite komponente za obradu problema i prezentacijski sloj. U tome radu objašnjavaju vezu potpore odlučivanju s područjem umjetne inteligencije i ekspertnih sustava.

R. Sprague i E. Carlson 1982. godine objavili su knjigu „Building Effective Decision Support Systems“. Ta knjiga sadrži općenite upute za izgradnju sustava za potporu odlučivanju.

Tijekom 90-tih godina dolazi do razvoja tehnologije skladištenja podataka i OLAP (eng. On Line Analytical Processing - OLAP). Razvoj ovih tehnologija omogućava razvoj posebne vrste sustava za potporu odlučivanju - Informacijskih sustava za izvršne rukovoditelje (eng. Executive Information Systems - EIS). [15]

4.2. Vrste DSS-a [16]

4.2.1. DSS zasnovan na modelu

DSS zasnovan na modelu naglašava pristup i manipulaciju kvantitativnim modelom. Na primjer algebarski, financijskim, optimizacijskim ili simulacijskim modelom. Kod njega se koriste jednostavni analitički alati temeljeni na algebarskom modelu te daju najniži, najelementarniju razinu funkcionalnosti. Koristi parametre i podatke koje pružaju donositelji odluka te im pružaju potporu u analizi situacije. Kvantitativni modeli pružaju funkcionalnost za ove sustave. Korisnici mogu unositi podatke i preuzimati ih iz specijalne baze podataka.

4.2.2. DSS zasnovan na podacima

Ovaj DSS naglašava pristup i manipulaciju u vremenskom nizu internih podataka poduzeća i vanjskih podataka u realnom vremenu. To su jednostavni sustavi dokumenata do kojih se pristupa pomoću upita i pristupnih alata te se dobije naosnovnija razina funkcionalnosti. Moguće je skladištiti veće količine podataka. Sustavi koji imaju analitički proces nude najvišu razinu funkcionalnosti. Koriste se za operativno ili strateško korištenje. Dominantna komponenta tih sustava je snimanje, pohrana i dohvat strukturiranih podataka.

4.2.3. DSS zasnovan na komunikacijama

Kod ovih sustava naglašena je komunikacija, suradnja i zajednička podrška odlučivanju korištenjem tehnologije. Oglasna ploča ili e-mail nejelementarija je razina funkcionalnosti. Ovi sustavi omogućuju dvjema ili više osoba da komuniciraju jedni s drugima, dijele informacije i koordiniraju svoje aktivnosti. Primjeri korištenja su audio konferencije, oglasne ploče, WEB-konferencije, virtualni svijetovi itd. Dominantne komponente arhitekture su komunikacije sposobnosti.

4.2.4. DSS zasnovan na dokumentima

Ovaj sustav integrira razne tehnologije pohranjivanja i obrade radi ružanja kompletnog pretraživanja i analize dokumenta. Primjeri dokumenata obuhvaćaju postupke, proizvodne specifičnosti, katalog sadržaja, zapisnike sa sjednica, korporativne podatke te važne poruke. Tražilica je snažana alat za donošenje odluke zasnovane na dokumentima. Ovaj tip sustava je jedan tip sustava za upravljanje znanjem.

4.2.5. DSS zasnovan na znanju

Ovakav sustav sugerira ili preporučuje mjere aktivnosti za menadžere. DSS sustavi zasnovani na znanju su sustavi osoba-računalo sa specijaliziranom mogućnošću rješavanja problema. Pohranjuju i primjenjuju znanje za razne specifične poslovne probleme poput klasifikacije i konfiguracije zadataka kao što su odobravanje kredita, upravljanje rizicima itd. Koristi vještačku inteligenciju i statističke tehnologije. Skladišta znanja i procesna znanja su dominantne komponente u arhitekturi ovih sustava.

4.2.6. DSS zasnovan na WEB-u

To je sustav koji komunicira s informacijama ili analizama za podršku odlučivanja kroz WEB okruženje (internet, ekstranet i intranet) koristeći WEB tehnologije. Na ovaj način donošenje odluka bude efikasnije te se smanjuju troškovi implementacije modela te se omogućuje bolja razmjena informacija. Power D. J. je definirao DSS zasnovan na WEB-u, kao računalni sustav koji pruža informacije za podršku odlučivanju ili alate za podršku odlučivanju menadžerima ili poslovnim analitičarima pomoću WEB pretraživača kao što je Internet Explorer. [17]

5. METODE VIŠEKRITERIJALNOG ODLUČIVANJA

Višekriterijalno odlučivanje je odlučivanje koje je zasnovano na različitim kriterijima koji služe za ocjenjivanje različitih varijanti rješenja problema. Njegova uloga nije samo isticanje najpogodnije opcije, nego se može koristiti i za rangiranje alternativa, njihovo izdvajanje ukoliko zadovoljavaju odnosno odvajanje prihvatljivih alternativa od neprihvatljivih. [18]

Zahvaljujući tehnologiji te visokom stupnju razvijenosti društva danas se generira mnoštvo podataka u sekundi. Ta činjenica omogućuje nam točnije donošenje odluka bazirano na konkretnim podacima, ali ujedno i poprilično komplicira proces donošenja odluka. Sa porastom količine podataka/informacija povećava se i mogući broj kriterija. Podatke i informacije moguće je podijeliti po različitim kriterijima te se na taj način omogućava adekvatnije donošenje odluka. Ali, tada donositelj odluke ima kompliciraniji i zahtjevniji posao. Vrlo je bitno donijeti ispravnu odluku stoga su razvijeni alati koji pomažu kod višekriterijalnog donošenja odluka.

Kod donošenja bilo koje odluke postoji utjecaj i osobnih želja donositelja te njegovog znanja i iskustva. Stvari kao osobna želja potrebno je svesti na što je moguće nižu razinu kako nebi utjecale na konačno rješenje, dok su stvari poput znanja i iskustva vrlo važne jer mogu pomoći pri dodjeljivanju važnosti određenih kriterija.

Važno je znati da je glavni cilj metoda višekriterijalnog odlučivanja poduprijeti donositelja odluke kada postoji velik izbor alternativa za problem koji se rješava. Rješenje problema se može tumačiti na različite načine. Može predstavljati odabir najboljeg od raznih ponuđenih alternativa, gdje se najbolja može tumačiti kao najpoželjnija alternativa donositelja odluke. Može pak odabrati mali skup dobrih alternativa ili grupirati alternative u različite skupove preferencija. Ovakva tumačenja se koriste kako bi se našle sve efikasne ili ne dominirajuće alternative. [19]

Općenito, višekriterijalno odlučivanje koristi se kao snažna tehnika u donošenju odluka, a koristi se prilikom ocjenjivanja rada zaposlenika, procjeni zdravstvene zaštite u postupanju s otpadom, određivanju bankarske učinkovitosti, internet bankarstvu, odabiru dobavljača, odabiru skladišnih lokacija, prilikom odabira alatnih strojeva ili tehnologija izrade itd.

Kod nekih primjena moguće je pojavljivanje određenih nesigurnosti pa se koristi tzv. *fuzzy* višekriterijalno odlučivanje. [19] Nesigurnost može se pojavljivati iz dva razloga. Prvi je da donositelj odluke nije 100% siguran kada donosi subjektivne procjene i takva se naziva

nesigurnost subjektivne prosudbe. Drugi razlog odnosi se na situaciju kada informacije o određenim kriterijima nisu potpune ili nisu dostupne, a taj razlog naziva se i nesigurnost zbog nedostatka podataka ili nepotpunih informacija. [20]

Kod takvih problema koriste se izvedenice običnih metoda višekriterijalnog odlučivanja koje su namijenjene problemima definiranim s određenom nesigurnošću- [19]

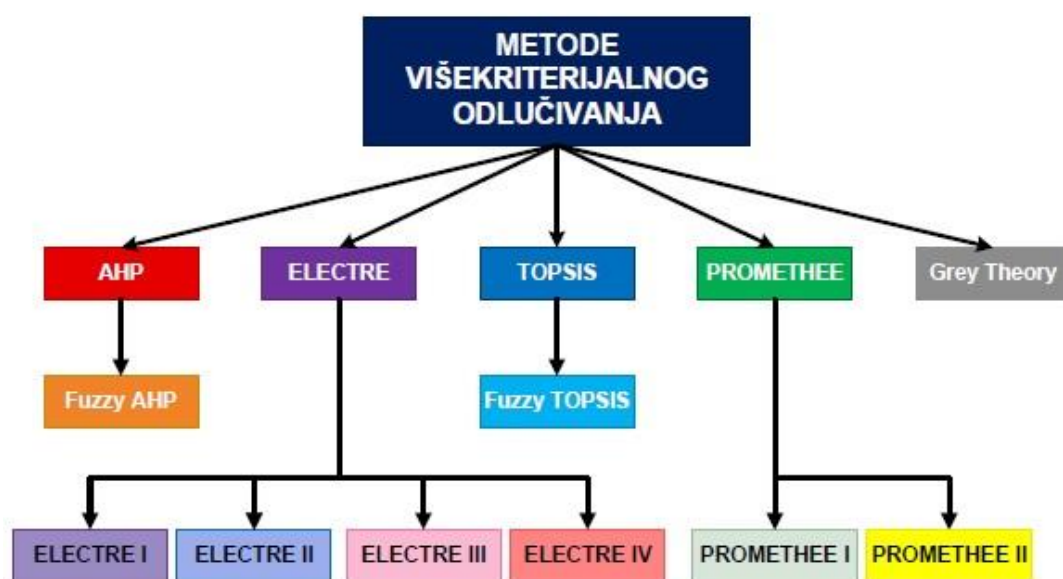
Postoji mnogo različitih metoda višekriterijalnog optimiranja, ali u okviru ovog diplomskog rada objasniti će se samo nekoliko najvažnijih prema izvoru [21]:

- AHP
- ELECTRE
- TOPSIS
- PROMETHEE
- Grey Theory.

Unutar ovog poglavlja reći će se o svakoj od metoda ponešto, dok će AHP metoda biti posebno obrađena u idućem poglavlju ovog diplomskog rada.

AHP metoda će se unutar ovog diplomskog rada koristiti kako bi se odabrala tehnologija izrade proizvoda. Na temelju „težina“ različitih kriterija i podkriterija dobiti će se rezultat koji bi trebao dati odgovor da li je proizvod isplativije raditi aditivnim tehnologijama ili konvencionalnim.

Na slici 8 prikazan je hijerarhijski pregled metoda višekriterijalnog odlučivanja.



Slika 6. Hijerarhijski pregled metoda višekriterijalnog odlučivanja [19]

5.1. ELECTRE

ELECTRE metoda datira iz 1965. godine kada je Bernard Roy na zahtjev ljudi iz tvrtke SEMA počeo razvijati metodu za višekriterijalno odlučivanje. ELECTRE (engl. *Elimination Et Choice Translating Reality*) danas poznata kao ELECTRE 1 služila je za izbor najbolje aktivnosti iz skupa aktivnosti.

Kasnije, iz različitih potreba, razvijale su se metode ELECTRE II, ELECTRE III i ELECTRE IV. ELECTRE II služi rješavanje problema rangiranja alternative od najbolje do najgore, ELECTRE III također je služila za rangiranje alternativa od najbolje do najgore samo je sad koristila pseudo-kriteriji te fuzzy binarne relacije. Nakon toga, izašla je metoda ELECTRE IV koje je proizašla iz problema vezanog uz parišku podzmenu željeznice. Postalo je moguće rangiranje alternativa bez korištenja koeficijenta kriterija relativne važnosti. [22]

ELECTRE metode su primjenjive kod problema odluke u situacijama sa sljedećim karakteristikama.

1. Donositelj odluke želi u model uključiti barem tri kriterija. No, procedure sastavljanja (agregiranja) su više prilagođene za modele odluka sa pet ili više kriterija (do dvanaest ili trinaest).

Dodatno, barem jedna od sljedećih situacija mora biti zadovoljena.

2. Alternative su evaluirane (za barem jedan kriterij) na uobičajenoj ili intervalnoj skali. Te skale nisu prikladne za usporedbu različitosti. Stoga, teško je i umjetno definirati smislenu funkciju usporedbe za različite alternative.
3. Među kriterijima postoji snažna nejednakost vezana uz prirodu evaluacije (npr. trajanje, glasnoća, udaljenost, osiguranje, znamenitosti, itd.). To čini teškim sastavljanje (agregaciju) svih kriterija na jedinstvenoj i smisljenoj skali.
4. Nadoknada izgubljenog na danom kriteriju sa dobitkom na drugom kriteriju možda nije prihvatljiva od strane donositelja odluke. Stoga, takve situacije zahtijevaju korištenje nenadoknativog sastavljanja (agregacije) procedura.
5. Za barem jedan kriterij sljedeće je istina : male razlike evaluacije nisu značajne u terminima preferencija, dok hrpa malih razlika može biti značajna. Ovo zahtijeva uvođenje razlikovnog praga (nerazličitosti i preferencije) što dovodi to strukture preferencija sa opsežnim ne-tranzitivnim binarnim relacijama nerazličitosti. [22]

Prednosti ove metode su neograničen broj kriterija pomoću kojih bi se rangirale alternative, te mogućnost i kvantitativnog i kvalitativnog iskazivanja kriterija i njihove važnosti. Nedostatak ove metode je nemogućnost primjene u uvjetima u kojima donositelj odluke nije iskazao prednost određenim kriterijima ispred drugih. [23]

5.2. TOPSIS

TOPSIS metoda (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) razvijena je od Hwanga i Yoon-a, a u prijevodu bi značila tehnika redoslijeda preferencija prema sličnosti idealnom rješenju. [23]

Zasniva se na konceptu da odabrana alternativa treba imati najkraću udaljenost od pozitivnoga idealnog rješenja i najdužu udaljenost od negativnoga idealnog rješenja. Optimalna alternativa je ona koja je u geometrijskom smislu najbliža idealnom pozitivnom rješenju, odnosno najdalja od idealnoga negativnog rješenja. Rangiranje alternativa zasniva se na "relativnoj sličnosti sa idealnim rješenjem" čime se izbjegava situacija da alternativa istovremeno ima istu sličnost s pozitivnim idealnim i s negativnim idealnim rješenjem. [24]

Pojmovi "najbolji" i "najgori" interpretiraju se za svaki kriterij posebno zavisno od toga je li u pitanju maksimalizacija ili minimalizacija kriterija. Znači da minimalna vrijednost ne znači doslovno vrijednost koja je najmanja jer kada se nešto minimalizira, minimalna vrijednost je u stvari najveća vrijednost nekog kriterija jer je cilj minimalizacije da vrijednost kriterija bude što manja. Da bi se izbjeglo razmišljanje kod kojeg kriterija je koji cilj, normalizira se matrica odlučivanja tako da svi ciljevi budu maksimizirani. [24]

Ova metoda se većinom koristi za rangiranje i poboljšavanje performansi rješenja, a rjeđe se koristi za same odluke. [21]

5.3. PROMETHEE

Godine 1982. Jean-Pierre Brans predstavio je metodu PROMETHEE I (engl. Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations) i PROMETHEE II. PROMETHEE I metoda služi za parcijalno rangiranje alternativa dok PROMETHEE II služi za potpuno, odnosno kombinirano rangiranje alternativa. Kasnije su razvijane i metode PROMETHEE III koja služi za rangiranje alternativa na osnovu intervala te metoda PROMETHEE IV koja služi za rangiranje alternativa na osnovu kontinuiranih slučajeva. [25]

U početku s eova metoda koristila u zdravstvu, no brzo je stekla primjenu i u bankarstvu, medicini, turizmu, kemijskoj industriji itd. Najveća prednost ove metode je njezina lakoća primjene. [23]

5.4. GREY THEORY

Ova metoda (hrv. *siva teorija*) koristi se za proučavanje nesigurnosti, a superiorna je u matematičkim analizama sustava s neizvjesnim informacijama. Izvorno razvijena od strane prof. Denga 1982. godine, postala je vrlo učinkovita metoda u rješavanju problema nesigurnosti, uzrokovanim diskretnim podacima i nepotpunim informacijama. Koristi se u rješavanju problema odlučivanja povezanih sa sivim sustavima, definiranih s malo informacija i podataka, poznatih na specifičnoj ljestvici i nepoznatih na specifičnoj ljestvici. *Grey theory* bavi se visokom matematičkom analizom sustava koji su djelomično poznati i djelomično nepoznati, a definirani su s nedovoljno podataka i nedovoljno znanja. Kada proces odlučivanja nije jasan, *grey theory* ispituje interakcijsku analizu, postoji veliki broj ulaznih podataka koji se razlikuju i nepotpuni su. Zadnjih godina, u rješavanju mnogih problema odlučivanja, uspješno se koristi njena metodologija. Pored višekriterijalnog odlučivanja, koristi se i u računalnoj grafici, prognoziranju te kontroli sustava. [19]

6. AHP METODA

Metoda Analitički hijerarhijski proces, utemeljena 1980. godine od strane Thomasa L. Satty-a, (engl. AHP - Analytic Hierarchy Process) spada u najpoznatije i posljednjih godina najviše korištene metode za odlučivanje kada se proces odlučivanja, odnosno izbor neke od raspoloživih alternativa ili njihovo rangiranje, temelji na više atributa koji imaju različitu važnost i koji se izražavaju pomoću različitih skala. AHP metoda omogućava fleksibilnost procesa odlučivanja i pomaže donositeljima odluka da postave prioritete i donesu kvalitetnu odluku uzevši u obzir i kvalitativne i kvantitativne aspekte odluke (Saaty, 1991.).

Široki spektar primjena AHP metode dovoljan je dokaz da je AHP metoda danas jedna od najpopularnijih i najčešće korištenih metoda za višekriterijsko odlučivanje u rješavanju realnih problema. Primjenjuje se u odlučivanju, evaluaciji, alokaciji resursa, planiranju i razvoju, ali i u područjima kao što su industrija, vojska, inženjerstvo, politika, obrazovanje te mnoga druga.

AHP metoda je snažan alat koji se koristi kod problema koji zahtjeva objektivnu prosudbu pri donošenju odluke, a na temelju matematičke podloge daje rezultat. Dobiveni rezultat predstavlja znanstveni pristup rješavanju problema odabira. Zbog opsežnosti i točnosti samog procesa odabira, potrebno je provesti istraživanje koje uključuje odabir i analizu kriterija, ujedno i najznačajniji dio hijerarhijskog modela pri odabiru alternative. Kvalitetna obrada atributa kriterija je potrebna zbog kasnijeg ponderiranja kriterija prema važnosti za postizanje cilja. [26]

AHP metoda se zasniva na četiri aksioma [26] :

1. *Aksiom recipročnosti* - ako je element A n puta značajniji od elementa B, tada je element B $1/n$ puta značajniji od elementa A.
2. *Aksiom homogenosti* - usporedba ima smisla jedino ako su elementi usporedivi - npr. ne može se uspoređivati težina komarca i težina slona.
3. *Aksiom zavisnosti* - dozvoljava se usporedba među grupom elemenata jednog nivoa u odnosu na element višeg nivoa, tj. usporedbe na nižem nivou zavise od elementa višeg nivoa.
4. *Aksiom očekivanja* - svaka promjena u strukturi hijerarhije zahtjeva ponovno računanje prioriteta u novoj hijerarhiji.

6.1. Postupak provođenja AHP metode

AHP metoda ima veliku važnost u strukturiranju problema i procesu donošenja odluke. Primjenom AHP metode omogućava se interaktivno kreiranje hijerarhije problema koja služi kao priprema scenarija odlučivanja, zatim se vrši uspoređivanje u parovima elemenata hijerarhije (ciljeva, kriterija i alternativa) u *top-down* ili *bottom-up* smjeru, te se na kraju vrši sinteza svih uspoređivanja i određuju se težinski koeficijenti svih elemenata hijerarhije (normiranje). Zbroj težinskih koeficijenata elemenata na svakoj razini hijerarhije jednak je 1 i omogućava donositelju odluke da rangira sve elemente hijerarhije po važnosti. [26]

AHP omogućava i interaktivnu analizu osjetljivosti. Preko analize osjetljivosti sagledava se kako promjene ulaznih podataka utječu na izlazne rezultate. U analizi osjetljivosti mogu se simulirati važnosti kriterija/podkriterija i promatrati promjene u rang u alternativa. Analiza se može izvesti iz cilja ili bilo kojeg drugog objekta u hijerarhiji kako bi se utvrdilo da li je rang lista alternativa dovoljno stabilna u odnosu na prihvatljive promjene ulaznih podataka. Ukoliko se promjenom ulaznih podataka za 5% u svim mogućim kombinacijama, ne promijeni rang alternativa, smatra se da je postignuta stabilnost rezultata. [26]

6.1.1. Koraci u provođenju AHP metode [27]

Prilikom primjene AHP metode postoji nekoliko faza:

- 0 faza: Strukturiranje problema
- I. faza: Određivanje najznačajnijeg kriterija
- II. faza: Određivanje najznačajnije alternative
- III. faza: Određivanje konačnog rješenja (cilja)

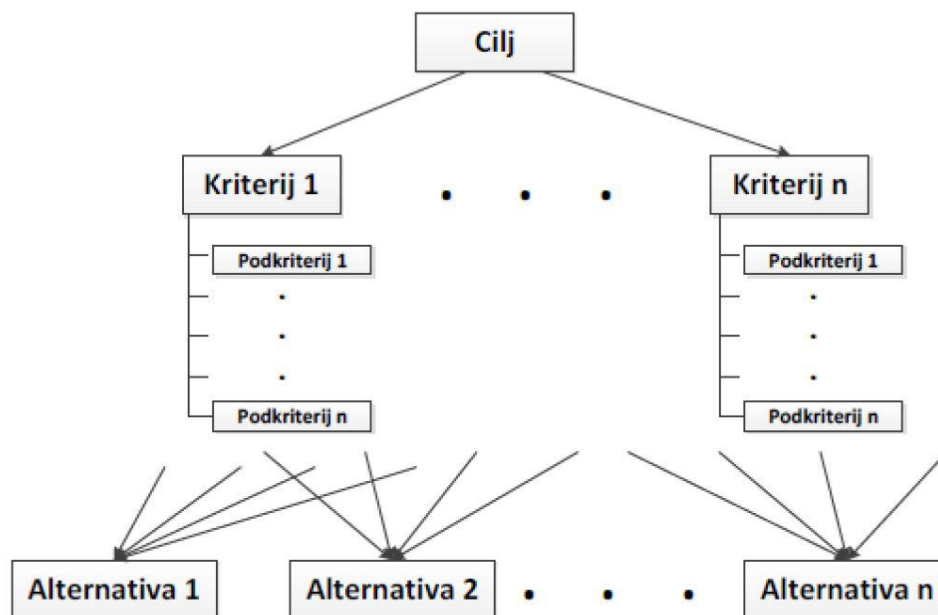
U idućih nekoliko potpoglavlja dati će se kratki uvid u svaku od tih faza.

6.1.2. 0. faza: Strukturiranje problema [28]

Unutar nulte faze strukturiranja problema razvija se hijerarhijski modela problema odlučivanja za slijedeće razine:

- Cilj
- Kriteriji
- Podkriteriji
- Alternative.

Na slici 9. dan je grafički prikaz strukturiranja problema unutar AHP metode.



Slika 7. Strukturiranje problema AHP metode [29]

Kada se model stukturira na ovaj način postavljeni su temelji procesa donošenja odluke. Postavljanje kriterija i podkriterija čine najbitniji dio cijele strukture.

Kompleksnost problema raste s brojem kriterija i s brojem alternativa. Sposobnost ljudskog uma u međusobnom razlikovanju velikog broja alternativa i kriterija je ograničena, te se u skladu s time, pri formiranju hijerarhije ne preporuča više od 5 ± 2 elemenata na istoj razini. [26]

Strukturiranjem problema završena je 0. faza donošenja odluke AHP metodom.

6.1.3. I i II. faza: Određivanje najznačajnijeg kriterija i alternative

Na svakoj razini hijerarhije potrebno je u parovima međusobno usporediti elemente strukture. Takva usporedba radi se pomoću Saatyve skale relativne važnosti, a skala ima 5 stupnjeva i 4 međustupnja verbalno opisanih intenziteta i odgovarajuće numeričke vrijednosti u rasponu od 1-9.

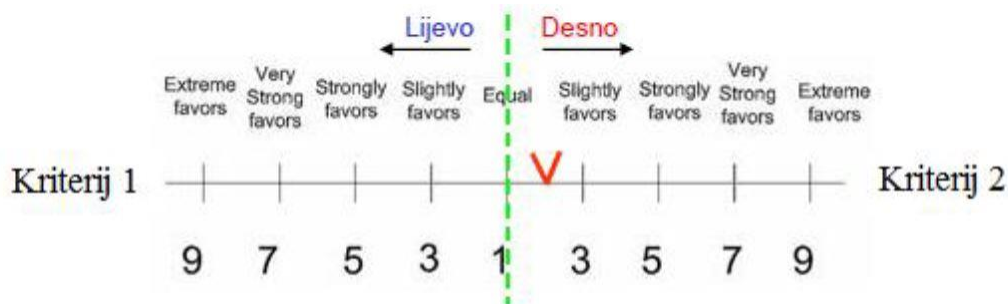
Kriteriji koji se međusobno uspoređuju mogu biti kvalitativni i kvantitativni.

Kada se govori o kvalitativnim kriterijima njih je moguće vrednovati samo na temelju iskustva ili prethodnih znanja, a to utječe na subjektivnost prilikom procesa odlučivanja a samim time i na objektivnost rezultata odlučivanja.

Kvantitativne kriterije lako je usporediti jer za njih imamo konkretne podatke što znači da i sami proces postaje objektivniji. Jednako tako, utjecaj donositelja odluke elimira se do neke

mjere, ali ne skroz jer uvijek ostaje doza subjektivnosti prilikom ponderiranja kriterija i alternativa.

Ono što uvelike može umanjiti subjektivnost kod donošenja odluke je detaljna analiza kriterija i alternativa. Nedovoljnim poznavanjem važnosti određenog kriterija ili manjak podataka o alternativni može dovesti do rezultat koji nije objektivno najpovoljniji niti najbolji izbor.



Slika 8. Saatyeva skala relativne važnosti [28]

Proces uspoređivanja se izvodi pomoću brojčane Saatyeve skale pri čemu veći broj daje veću vrijednost kriterija ili alternative.

Brojčane vrijednosti prikazane su na slici 10, a na slici 11 dano je objašnjenje svake vrijednosti.

Intenzitet važnosti	Definicija	Objašnjenje
1	Jednako važno	Dvije aktivnosti jednako doprinose cilju.
3	Umjereno važnije	Na temelju iskustva i procjena, daje se umjerena prednost jednoj aktivnosti u odnosu na drugu.
5	Strogo važnije	Na temelju iskustva i procjena, strogo se favorizira jedna aktivnost u odnosu na drugu.
7	Vrlo stroga, dokazana važnost	Jedna aktivnost izrazito se favorizira u odnosu na drugu, njezina dominacija dokazuje se u praksi.
9	Ekstremna važnost	Dokazi na temelju kojih se favorizira jedna aktivnost u odnosu na drugu, potvrđeni su s najvećom uvjerljivošću.
2, 4, 6, 8	Međuvrijednosti	
1,1 – 1,9	Decimalne vrijednosti	Pri usporedbi aktivnosti koje su po važnosti blizu jedna drugoj, potrebne su decimalne vrijednosti kako bi se preciznije izrazila razlika u njihovoj važnosti.

Slika 9. Opis vrijednosti sa Saatyeve skale [26]

Rezultati uspoređivanja elemenata na nekoj od razina hijerarhije smještaju se u određene matrice usporedbe. Npr., ako se međusobno usporedi n elemenata u odnosu na odgovarajući element na neposredno višem nivou hijerarhije, tada se pri usporedbi elementa i u odnosu na element j putem Saatyjeve skale određuje numerički koeficijent a_{ij} i smješta na odgovarajuću poziciju u matrici A prikazanoj na slici 12. [26]

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdot & \cdot & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdot & \cdot & a_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdot & \cdot & a_{nn} \end{bmatrix}$$

Slika 10. Matrica A [28]

Recipročna vrijednost rezultata uspoređivanja se smješta na poziciju a_{ji} da bi se sačuvala konzistentnost usporedbe. Npr., ako je element 1 neznatno favoriziran u odnosu na element 2, na mjestu a_{12} matrice A bio bi broj 5, a na mjestu a_{21} recipročna vrijednost 1/5.

Smisao matrice usporedbe najbolje se može razumjeti iz sljedećeg. U "savršenom svijetu" što je identično konzistentnom vrednovanju, matrica A, u koju se smještaju rezultati uspoređivanja bila bi ista kao matrica X (Slika 13.). [26]

w_i predstavlja relativni težinski koeficijent elementa i

$$X = \begin{bmatrix} \frac{w_1}{w_1} & \frac{w_1}{w_2} & \dots & \frac{w_1}{w_n} \\ \frac{w_2}{w_1} & \frac{w_2}{w_2} & \dots & \frac{w_2}{w_n} \\ \frac{w_3}{w_1} & \frac{w_3}{w_2} & \dots & \frac{w_3}{w_n} \\ \frac{w_n}{w_1} & \frac{w_n}{w_2} & \dots & \frac{w_n}{w_n} \end{bmatrix}$$

Slika 11. Matrica X [28]

U sljedećem koraku, definirana matrica usporedbe množi se sama sa sobom te nakon množenja matrica dobiva se nova matrica tzv.. **1. iteracije** iz koje se određuje **1. Vektor prioriteta**.

Nadalje **1. vektor** prioriteta određuje se tako da se sumira redove nove matrice, te normalizacijom sume redova dobiva se vektor prioriteta. Normalizacija se provodi da bi podaci bili uniformni i usporedivi.

Sljedeći korak je 2. iteracija tj. **nova matrica** koja se dobiva množenjem 1. iteracije same sa sobom, te iz nje se dobije **2. vektor prioriteta** sumiranjem i normalizacijom redova novonastale matrice.

Kada postoje dva vektora prioriteta izračunava se vektor razlike, te ako je njegov iznos zanemariv određuje se najznačajniji kriterij ili alternativa. a Ako je iznos vektora razlike značajan, računa se nova iteraciju i novi vektor prioriteta te se ponovo traži vektor razlike. Ako u nekoliko sljedećih iteracija, iznos vektora razlike nije zanemariv postupak nije konzistentan.

6.1.4. III. faza: Određivanje konačnog rješenja

Nakon što je određen vektor prioriteta alternativa i vektor prioriteta kriterija, ta dva vektora se množe i dobiva se vektor prioriteta cilja. Iz vektora prioriteta cilja s obzirom na kriterije i alternative dobiva se rješenje složenog problema. Najbolja alternativa uz postavljene uvjete je ona koja je poprimila najveću vrijednost u vektoru prioriteta cilja.

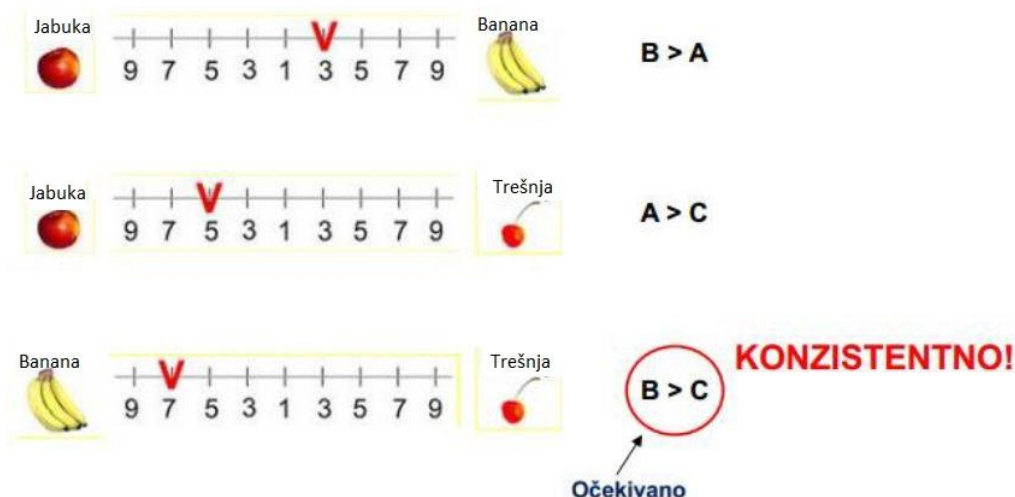
6.1.5. Konzistencija

Ono što AHP čini popularnim i masovno korištenim je to što ima sposobnost analiziranja i identificiranja nekonzistentnosti donositelja odluke u procesu uspoređivanja i vrednovanja elemenata hijerarhije.

Konzistentnost predstavlja dosljednost donositelja odluke prilikom ponderiranja kriterija i alternativa. Čovjek kao donositelj odluke je rijetko konzistentan pri procjenjivanju vrijednosti ili kvalitativnih značajki elemenata u hijerarhiji. AHP je alat koji ublažava taj problem na način da računa omjer konzistencije i o tome obavještava donositelja odluke.

Konzistentnost se može objasniti preko slike 14. Slika 14 prikazuje konzistentnost jer je B većeg značaja od A, A je većeg značaja od C, što direktno znači da je B većeg značaja od C.

Nekonzistentnost procjena moguće je najjednostavnije objasniti pomoću primjera. Npr. ako se tvrdi da je A mnogo većeg značaja od B, B većeg značaja od C i C nešto većeg značaja od A, nastaje nekonzistentnost u rješavanju problema i smanjuje se pouzdanost rezultata. Grafički prikaz dan je na slici 14.



Slika 12. Konzistentcija [28]

Da bi se procijenila konzistentnost odlučivanja potrebno je izračunati *mjeru konzistentcije* tj. indeks konzistentcije CI , a računa se prema sljedećem izrazu:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

gdje je: λ_{max} – najveća svojstvena vrijednost

n – broj kriterija

Slučajni indeks konzistentnosti RI ovisi o redu matrice, a dobiven je tako što je prof. Saaty za svaku matricu veličine n generirao nasumične matrice te izračunao njihovu srednju vrijednost CI i nazvao je *slučajni indeks konzistentcije* RI (Slika 15.)

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
RI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.48	1.56	1.57	1.59

Slika 13. Slučajni indeks konzistentcije RI [29]

Omjer konzistentcije CR je omjer indeksa CI i indeksa RI

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (4)$$

Ako je stupanj konzistentnosti CR manji od 0,10, rezultat se smatra dovoljno točan i nema potrebe korigirati usporedbe i ponavljati proračun. Ako je *stupanj konzistentnosti* CR veći od

0,10, rezultat bi trebalo ponovo analizirati i ustanoviti razloge nekonzistentnosti, ukloniti ih, te ako se nakon ponavljanja postupka u nekoliko koraka, stupanj konzistentnosti CR ne smanji ispod granice od 0,10, *sve rezultate treba odbaciti i ponoviti cijeli postupak ispočetka*. [29]

6.2. Prednosti i nedostatci AHP metode

Na prednosti Analitičkog hijerarhijskog procesa kao metode za podršku odlučivanju ukazivali su brojni znanstvenici i praktičari (Saaty, 1977., 1980., 1991. 2006., Schoemaker & Waid, Narasimhan, 1983., Harker & Vargas, 1987., Alphonse, 1997., Karlsson, 1998., Triantaphyllou, 2000., Sunn, 2001., Hamalainen, 2004.). Ako se usporedi s drugim metodama, AHP metoda često je pokazivala bolje uporabne karakteristike, a od velike je važnosti, ukoliko se ima u vidu da donositelji odluka često nisu htjeli koristiti sofisticirane metode odlučivanja. AHP metoda ima i određene nedostatke koji će također biti navedeni u ovom poglavlju. [26]

Prednosti AHP metode su [15]:

- Prednosti AHP u odnosu na druge višekriterijske metode su njezina fleksibilnost, intuitivna bliskost donositeljima odluka i sposobnost provjere nekonzistentnosti. Općenito, korisnici smatraju da je metoda parne usporedbe unosa podataka jednostavna i praktična.
- AHP metoda ima izrazitu prednost u tome što razgrađuje problem odlučivanja u njegove sastavne dijelove i gradi hijerarhiju kriterija. Ovdje postaje jasna važnost svakog elementa (kriterija).
- AHP pomaže zabilježiti i subjektivne i objektivne mjere procjenjivanja. Pružajući koristan mehanizam za provjeru dosljednosti mjera evaluacije i alternativa, AHP smanjuje pristranost u odlučivanju.
- AHP metoda podržava skupno donošenje odluka konsenzusom, izračunavanjem pojedinih parnih usporedbi geometrijskim načinom.
- AHP je jedinstveno pozicionirana da bi pomogla modelima situacija neizvjesnosti i rizika, budući da je sposobna za izvođenje mjernih ljestvica tamo gdje mjere obično ne postoje.
- U AHP analizu mogu se uključiti kriteriji i alternative s kvalitativnim i kvantitativnim vrijednostima
- AHP metoda je primjenjiva u rješavanju vrlo kompleksnih problema odlučivanja.

- Implementacija ocjenjivanja važnosti kriterija provodi se na način sličan ljudskom ocjenjivanju.
- Širokog područje primjene i dobre računalne implementacije (Expert Choice).

Nedostatci AHP metode su [26]:

- Nedovoljno velika skala (Saatyeva skala relativne važnosti) za uspoređivanje elemenata u parovima vezano uz neke probleme odlučivanja,
- Nisu dozvoljene neusporedive alternative.
- Velik broj potrebnih komparacija u parovima kod većine problema,
- Postizanje prihvatljivog omjera konzistencije je često vrlo teško,
- Principijelno troškovi mogu biti uključeni u AHP model. Uključivanjem troškova (npr. cijena koštanja) unutar AHP modela može se dobiti preskupu alternativu s velikim brojem benefita, a zapravo se traži jeftina alternativa sa što je moguće većim brojem benefita. Zbog toga kod kompleksnih odlučivanja predlaže se zasebno razmatranje *troškova alternativa* od razmatranja benefita koje iste donose. [25]

6.3. EXPERT CHOICE Ver. 11.5

Expert Choice danas je jedan od najpoznatijih programa za donošenje odluka. Kao što je rečeno u uvodu ovog rada, donositi odluke nije jednostavno, a pogotovo nije jednostavno kada se radi o odlukama temeljenim na više različitih kriterija. E baš kod takvih problema na vidjelo izlazi sva moć Expert Choica.

Expert Choice u sebi ima implementiranu AHP metodu baziranu na matematičkoj logici čime program može egzaktno računati i prikazivati rezultate. Program se koristi u svim granama industrije, ali i ostalim poslovnim djelatnostima poput poljoprivrede, ekonomije, vojnih strategija itd. Neke od tvrtki koje se koriste aplikacijom su NASA, Washington Gas, Roche, Sprint, MWH, Boeing, Alliance, US Department od defense itd. [30]

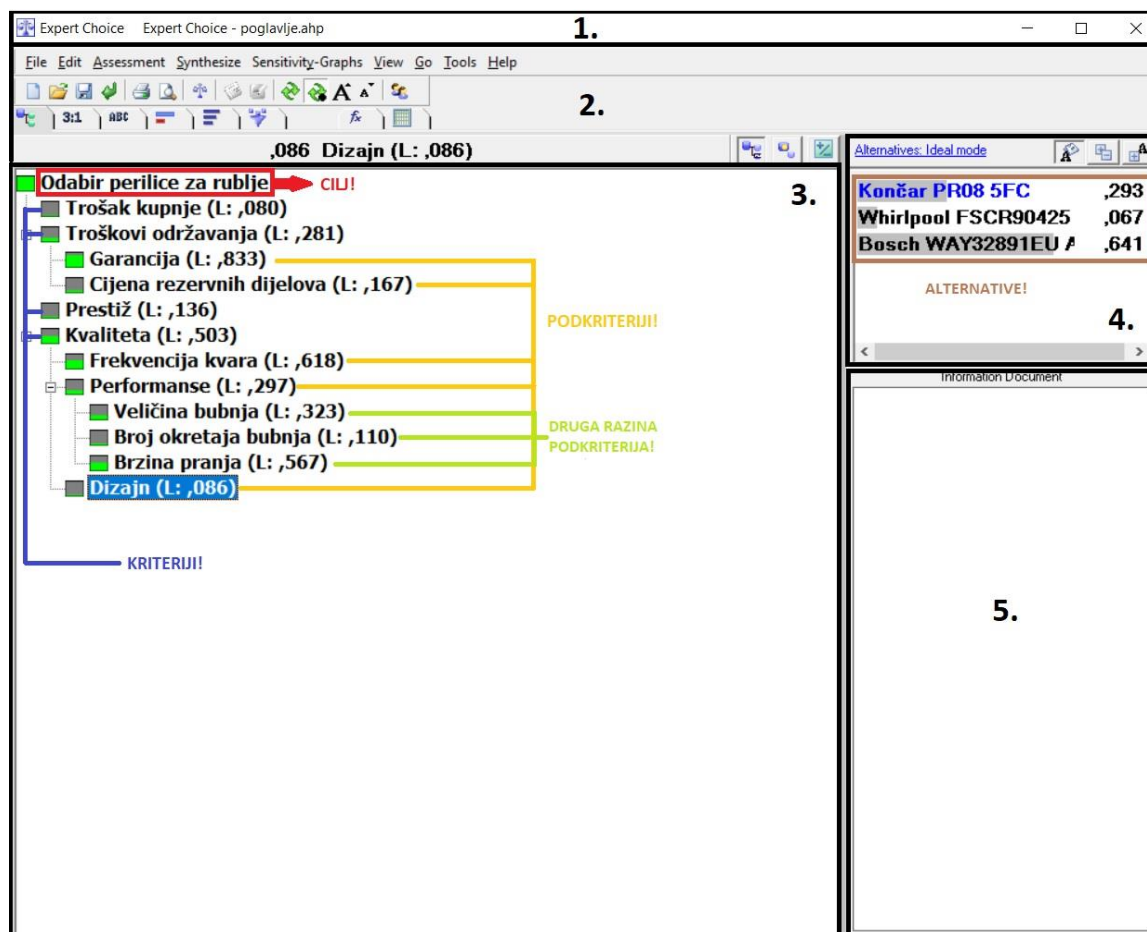
Program su napravili Thomas Saaty i Ernest Forman 1983. godine. [30] Ono što taj program omogućuje je formiranje problema te strukturiranje bez ograničenja kompleksnosti strukture. Omogućeno je zadavanje i uspoređivanje važnosti različitih objekata i alternativa na nekoliko načina. Vrlo lako se sistematiziraju informacije, provode ekspertize ili prosudbe. Jednako tako, omogućeno je provođenje *what-if* analize i analize osjetljivosti, to jest ispitivanje promjene ulazne vrijednosti (eng. input) na izlaznu vrijednost (eng. output).

U ovom radu istraživanje će biti provedeno uprimjenom *Expert Choic-a Ver.11.5*.

6.3.1. Sučelje i strukturiranje problema

U ovom potpoglavlju biti će opisano sučelje Expert Choica 11.5 te će se prikazati strukturiranje jednostavnog problema koji ima za cilj donijeti odluku o kupnji optimalne perilice rublja. Opisivanje sučelja vobaviti će se kroz taj primjer.

Na slici 16. biti će prikazano sučelje i primjer strukturiranog problema unutar software-a Expert Choica-a 11.5.



Slika 14. Sučelje i strukturirani problem unutar Expert Choica 11.5

Kao što je prikazano na slici 16. sučelje programa može se podijeliti u 5 dijelova:

- 1) naslovna traka,
- 2) alatna traka,
- 3) stablo odlučivanja,
- 4) popis alternativa,
- 5) opis alternativa.

U nastavku ovog poglavlja o svakom dijelu sušelja biti će malo više rečeno.

1. Naslovna taka

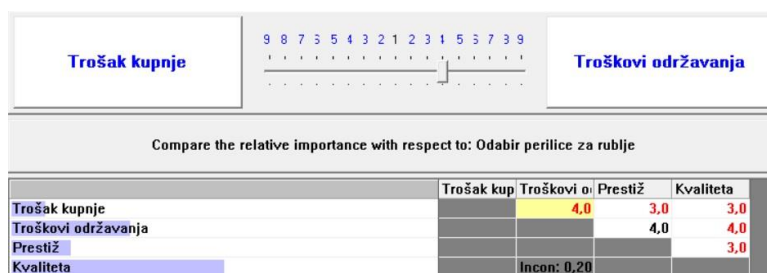
Na naslovnoj traci vidi se naziv slučaja na kojem se radi.

2. Alatna traka

Alatna traka sadržava puno različitih opcija. Na alatnoj traci, između ostalog se nalaze, osnovne funkcije poput File-a, Edit-a, Assessmenta, Synthesize ili Sensitivity-Graphs opcije.

Jednako tako na alatnoj traci pruža se mogućnost odabira različitih načina usporedbi alternativa/kriterija. Moguće ih je uspoređivati numeričkom komparacijom (slika 17.), opisnom komparacijom (slika 18.) ili grafičkom komparacijom (slika 19.)

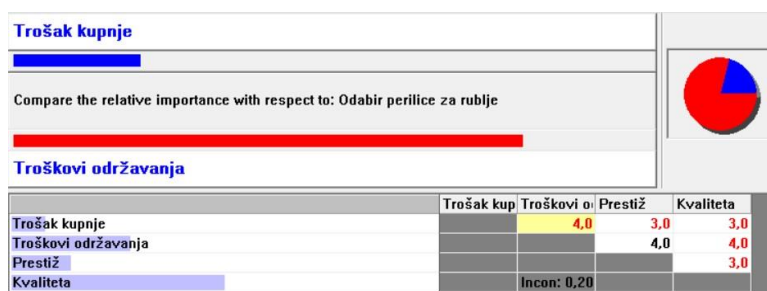
Moguće je birati da li će se rezultati prikazivati grafički, tablično ili svaki pojedinačno preko stabla odlučivanja.



Slika 15. Numerička komparacija



Slika 16. Opisna komparacija



Slika 17. Grafička komparacija

3. Stablo odlučivanja

Stablo odlučivanja prikazuje cilj, sve kriterije i sve podkriterije koje smo zadali prilikom definiranja problema. U svakom trenu moguće je dodati nove kriterije i nove alternative, a isto tako i maknuti bilo koji od njih.

Pored svakog kriterija ili podkriterija vidi se, grafički i numerički, njegov udio u konačnom rezultatu. (vidi sliku 16.)

4. Popis alternativa

U ovom prozoru nalaze se sve alternative koje smo dodali u problem. Moguće ih je uspoređivati po različitim kriterijima i podkriterijima te na kraju dobiti grafički i brojčani iznos njihovog udjela u konačnom rezultatu. (vidi sliku 16.)

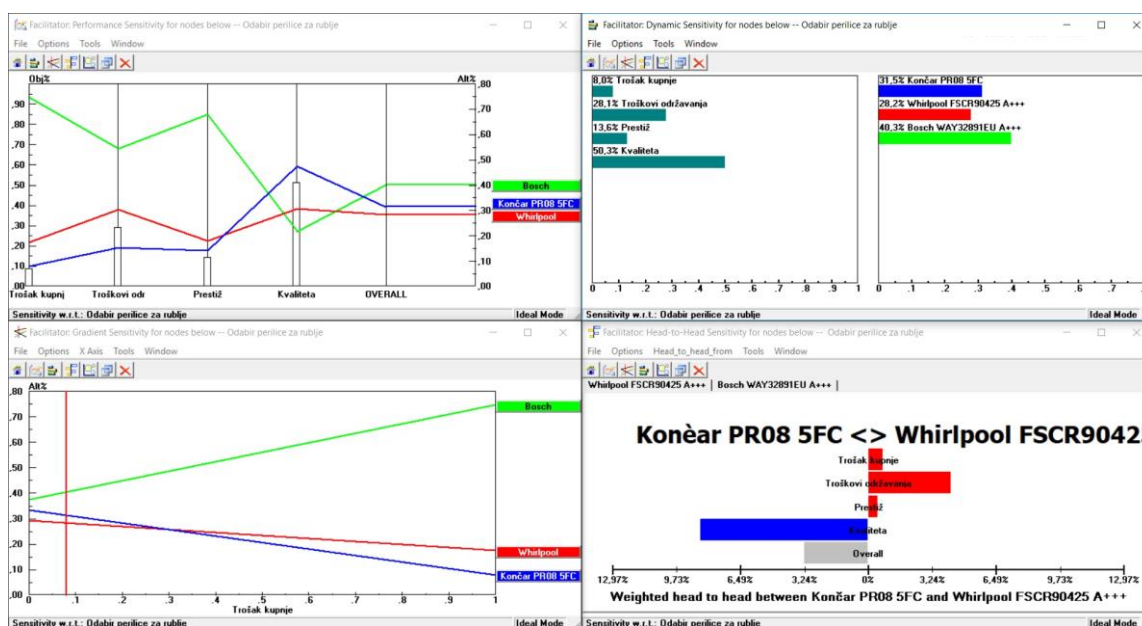
5. Opis alternativa

Svakoj od alternativa može se pridružiti i dodatni opis, dodatne informacije ili nešto drugo i to će biti prikazano unutar ovog prozora.

6.3.2. Prikaz rezultata

Rezultati se u Expert Choiceu se mogu prikazati na nekoliko načina, grafovima osjetljivosti, te se na tim prikazima lako može provesti analiza rezultata. (Slika 20.)

Pomoću takvih grafova moguće je pratiti što se događa ukoliko se određeni parametri promijene te prema tomu donositi zaključke i odluke.

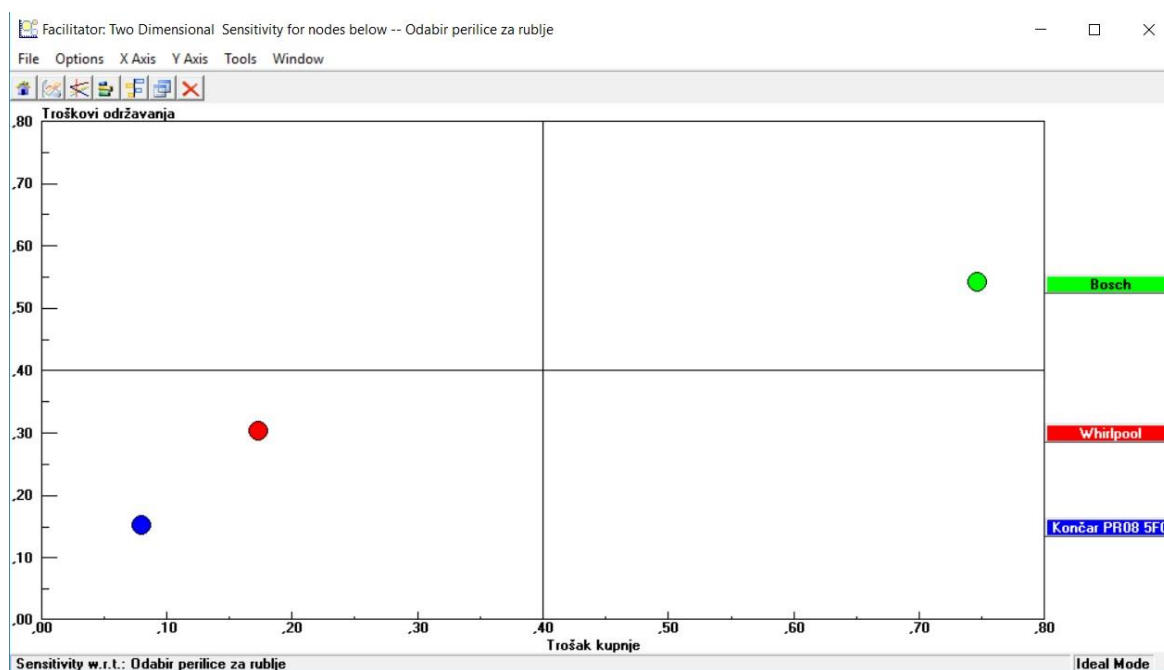


Slika 18. Grafovi osjetljivosti

Grafovi prikazani na slici 20. Spadaju pod grafove osjetljivosti a njihova imena su: (odozgo prema dole, slijeva na desno):

- *Performance* (1)
- *Dynamic* (2)
- *Gradient* (3)
- *Head to head* (4)
- *2D graf osjetljivosti* (slika 21.)

Peti graf osjetljivosti, koji je prikazan na slici 21. , zove se 2D graf osjetljivosti.



Slika 19. 2D graf osjetljivosti

- *Performance* [31]

Opcija Performance omogućava prikaz utjecaja pojedinih težina kriterija na poredak alternativa. Razlikuju se:

- trenutni poredak alternativa - predstavlja promjenu prioriteta alternative pod utjecajem težine jednog kriterija
- ukupni poredak alternativa - predstavlja poredak alternativa pod utjecajem težina svih kriterija

➤ *Dynamic [31]*

Opcija Dynamic omogućava dinamički grafički prikaz uvida u to kako se dinamički mijenjaju prioriteti alternativa ukoliko se mijenjaju težine pojedinih kriterija. Jednostavnim povlačenjem miša lijevo ili desno, smanjuje se ili povećava važnost određenog kriterija, dok se težine ostalih kriterija proporcionalno mijenjaju u odnosu na početne težine kriterija.

Ovaj ekran ima i opciju Components u kojoj je moguće vidjeti udjele težina pojedinih kriterija u ukupnom prioritetu alternativa.

➤ *Gradient [31]*

Gradient prikaz predočuje kako promjene težina pojedinih kriterija utječu na prioritete alternativa.

➤ *Head-to-head [31]*

U Head to Head opciji analize osjetljivosti moguće je jednostavnim korištenjem miša vizualizirati odnose razmatranih alternativa u svim parovima na način da međusobni kvalitativni odnos dvije alternative bude prikazan pravokutnim površinama. Informacije o tome koja je alternativa bolja, predstavljena je prostornom pozicijom pravokutnika.

➤ *2D graf osjetljivost [31]*

U 2D opciji analize osjetljivosti prikazani su prioriteti alternativa s obzirom na dva kriterija koja se uspoređuju. Moguće je analizirati prioritete alternativa pri bilo kojoj kombinaciji dva kriterija. Područje 2D grafikona je podijeljeno na 4 kvadranta.

7. ODREĐIVANJE KRITERIJA I PRIPREMA PODATAKA ZA ODABIR VARIJANTE IZRADE

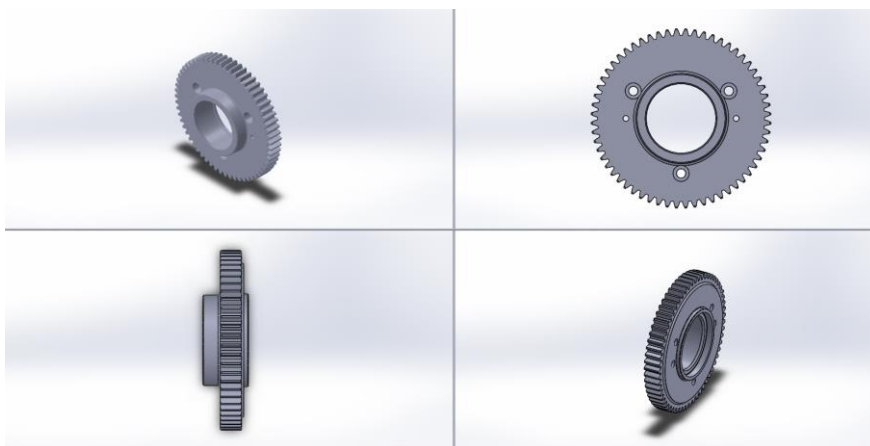
Unutar ovog poglavlja dati će se temelji za odabir varijante izrade proizvoda. Prikazati će se proizvod za koji je vršen odabir, dati će se osnovne informacije o proizvodu, vremenima izrade te cijeni izrade proizvoda. Prikazati će se formiranje teorijskog i modificiranog stabla odlučivanja te će biti prikazani podaci na temelju kojih je vršen odabir.

Prilikom formiranja modificiranog stabla odlučivanja, kretalo se od pretpostavke da se radi o zamišljenom virtualnom pogonu koji posjeduje mogućnost izrade proizvoda i konvencionalnim¹ i aditivnim tehnologijama. Kod teorijskog stabla takve pretpostavke nisu uzete u obzir.

7.1. Osnovne informacije o proizvodu

Odabrani proizvod je zupčanik. [32] Radi se o zupčanicu za kojeg je proučavana optimizacija operacije bušenja. Izvršen je odabir između nekoliko varijanti bušenja, te je prema kriteriju najnižih troškova odabrana optimalna. Postoji već razrađen tehnološki proces izrade zupčanika konvencionalnim tehnologijama, izračunato je vrijeme izrade za svaku operaciju te je izračunato ukupno komadno vrijeme. Jednako tako, za svaku operaciju prikazane su i cijene koštanja, te cijena konačnog proizvoda.

Na slici 22. dan je 3D prikaz zupčanika, u Solidworks-u, iz četiri različita kuta. Radionički crtež zupčanika dan je u prilogu II.



Slika 20. Prikaz zupčanika kreiranog u Solidworks-u

¹ Konvencionalne tehnologije izrade – u ovom radu pod izrazom konvencionalne metode izrade podrazumijevati će se sve metode koje nisu aditivne tehnologije, primarno se misli na obradu odvajanjem čestica.

7.1.1. Tehnološki proces izrade zupčanika klasičnim strojevima

Tehnološki proces izrade zupčanika na klasičnim strojevima dan je u završnom radu [32]. U ovom poglavlju biti će prikazan redoslijed operacija, strojevi na kojima su operacije vršene te vremena izrade svake od operacija. Komadno vrijeme nije posebno računato za potrebe ovog rada jer ono ovisi o veličini serije koja može biti različito definirana.

U tablici 7.1. prikazan je redoslijed operacija izrade zupčanika na klasičnim strojevima.

Tablica 7.1. Redoslijed operacija izrade zupčanika – klasični strojevi

KLASIČNI STROJEVI (vremena su prikazana u minutama)	
10) TOKARENJE	
Stroj: Univerzalna tokarilica TVP 200	
$t_{pz} = 35$	$t_{pz,uk} = 42$
$t_p = 3,35$	$t_t = 1,09$
$t_c = 5,89$	
20) TOKARENJE	
Stroj: Univerzalna tokarilica TVP 200	
$t_{pz} = 35$	$t_{pz,uk} = 42$
$t_p = 7,18$	$t_t = 2,14$
$t_c = 11,18$	
30) Bušenje $\phi 5 \times 20$	
Stroj: Bušilica sa viševretnim glavom VS20	
$t_{pz} = 25$	$t_{pz,uk} = 30$
$t_p = 0,68$	$t_t = 0,27$
$t_c = 1,14$	
35) Bušenje $\phi 8 \times 20$	
Stroj: Bušilica sa viševretnim glavom VS20	
$t_{pz} = 25$	$t_{pz,uk} = 30$
$t_p = 0,68$	$t_t = 0,21$
$t_c = 1,07$	
40) Bušenje $\phi 8 \times 5$	
Stroj: Bušilica sa viševretnim glavom VS20	
$t_{pz} = 25$	$t_{pz,uk} = 30$
$t_p = 0,68$	$t_t = 0,08$
$t_c = 0,91$	
50) Upuštanje $\phi 14 \times 10$	
Stroj: Bušilica sa viševretnim glavom VS20	
$t_{pz} = 25$	$t_{pz,uk} = 30$
$t_p = 0,68$	$t_t = 0,1$
$t_c = 0,94$	
60) Glodanje zubi	
Stroj: Obodna glodalica Hurth WF10	
$t_{pz} = 35$	$t_{pz,uk} = 42$
$t_p = 2,04$	$t_t = 17,76$
$t_c = 23,76$	
70) Skidanje srha od glodanja	
Stroj: Glodalica Hurth ZK7R	

$t_{pz} = 20$	$t_{pz,uk} = 24$
$t_p = 0,47$	$t_t = 0,75$
$t_c = 1,46$	
80) Toplinska obrada	
90) Brušenje	
Stroj: Brusilica za okruglo brušenje AFB 300	
$t_{pz} = 30$	$t_{pz,uk} = 36$
$t_p = 4,85$	$t_t = 3,14$
$t_c = 9,59$	
100) Brušenje	
Stroj: Brusilica za okruglo brušenje AFB 300	
$t_{pz} = 30$	$t_{pz,uk} = 36$
$t_p = 1,15$	$t_t = 0,4$
$t_c = 1,86$	
110) Brušenje zubi	
Stroj: Reishauer TIP NZA	
$t_{pz} = 120$	$t_{pz,uk} = 144$
$t_p = 0,87$	$t_t = 18,59$
$t_c = 23,35$	

7.1.2. Tehnološki proces izrade zupčanika CNC strojevima

Kako je završni rad nastao 1995. godine vremena računata u njegovom radu mogu se smatrati zastarjelima. Napretkom tehnologije skratila su se i vremena ciklusa. Pomoćna vremena su se značajno skratila, dok se tehnološka vremena nisu puno mijenjala. Jednako tako, mogućnosti strojeva su postale puno veće. Numerički upravljani strojevi danas u jednom stezanju vrše i po nekoliko operacija koje su se na klasičnim strojevima morale odrađivati zasebno. U skladu sa svim tim činjenicama, tehnološki proces u korištenom završnom radu je doraden, uvedeni su novi strojevi te su korigirana vremena izrade. Vremena izrade korigirana su temeljem procjene bazirane iskustvom i razvojem razine automatizacije u zadnjih 23 godine. Tehnološka vremena ostavljena su ista, dok su pomoćna vremena podijeljena s korekcijskim faktorom 4.

Detaljnou razradom tehnološkog procesa izrade zupčanika na CNC strojevima vjerojatno je da bi se dobila drugačija vremena izrade, ali za potrebe ovog diplomskog rada korigirana vremena smatraju se zadovoljavajućim.

U tablici 7.2. prikazan je redoslijed operacija izrade zupčanika na CNC obradnim centrima.

Tablica 7.2. Redoslijed operacija izrade zupčanika – CNC

CNC (vremena su prikazana u minutama)	
OBRADA NA OBRADNOM CENTRU	
Stroj: HAAS ST-20Y	
Tpz je zajednički za sve operacije unutar ovog obradnog centra	
$t_{pz} = 50$	$t_{pz,uk} = 60$
10) TOKARENJE	
$t_p = 0,84$	$t_t = 1,09$
$t_c = 2,32$	
20) Bušenje $\phi 5 \times 20$	
$t_p = 0,17$	$t_t = 0,27$
$t_c = 0,53$	
30) Bušenje $\phi 8 \times 20$	
$t_p = 0,17$	$t_t = 0,21$
$t_c = 0,46$	
35) Upuštanje $\phi 14 \times 10$	
$t_p = 0,17$	$t_t = 0,1$
$t_c = 0,32$	
OBRADA NA OBRADNOM CENTRU	
Stroj: HAAS ST-20Y	
Tpz je zajednički za sve operacije unutar ovog obradnog centra	
$t_{pz} = 40$	$t_{pz,uk} = 48$
40) Tokarenje	
$t_p = 1,8$	$t_t = 2,14$
$t_c = 4,72$	
50) Bušenje $\phi 8 \times 5$	
$t_p = 0,17$	$t_t = 0,08$
$t_c = 0,3$	
60) Glodanje zubi	
Stroj: LIEBHERR LC 180	
$t_{pz} = 35$	$t_{pz,uk} = 42$
$t_p = 0,51$	$t_t = 17,76$
$t_c = 21,92$	
70) Skidanje srha od glodanja	
Stroj: LIEBHERR LC 180	
$t_{pz} = 20$	$t_{pz,uk} = 24$
$t_p = 0,12$	$t_t = 1,46$
$t_c = 1,90$	
70) Toplinska obrada - kaljenje	
80) Brušenje	
Stroj: Okuma GA25Wx400	
$t_{pz} = 30$	$t_{pz,uk} = 36$
$t_p = 1,21$	$t_t = 3,14$
$t_c = 5,22$	
90) Brušenje	
Stroj: GA25Wx400	
$t_{pz} = 30$	$t_{pz,uk} = 36$
$t_p = 0,29$	$t_t = 0,4$

$t_c = 0,83$	
100) Brušenje zubi	
Stroj: Liebherr LGG 180	
$t_{pz} = 90$	$t_{pz,uk} = 108$
$t_p = 0,22$	$t_t = 18,59$
$t_c = 22,57$	

7.2. 3D DMLS – aditivna tehnologija kojom se izrađuje zupčanik

Nakon savjetovanja sa relevantnim osobama odlučeno je da se zupčanik izrađuje tehnologijom 3D DMLS. Tehnologija DMLS, odnosno Direct Metal Laser Sintering (hrv. direktno lasersko srašćivanje metala), jedna je od najnaprednijih tehnologija 3D printanja danas. Radi na principu da se dijelovi proizvoda grade pomoću lasera te se ti slojevi praškastog metala selektivno sintetiziraju i spajaju u jednu cijelinu. [33]

Danas se 3D DMLS printanjem mogu printati materijali [34]:

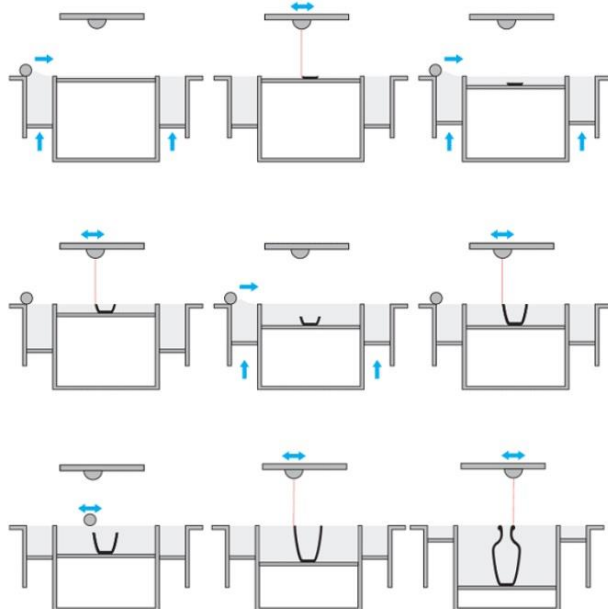
- Aluminij AlSi10Mg
- Legura kobalt krom Co28Cr6Mo
- CuCrZr Bakar krom cirkonij– u beta fazi
- Legura nikla In718
- Čelik 1.2709
- 316L Nehrđajući čelik
- 15-5PH Nehrđajući čelik
- Titanska legura Ti6Al4V
- Komercijalni titan TiCP

Princip rada samog 3D printera je vrlo jednostavan. Super tanki sloj praha raznese se pomoću valjka preko bazne ploče. U tom trenu počinje se zagrijavati i komora za printanje, ali prah se još uvijek ne počinje topiti jer nije dosegnuta točka taljenja. Nakon toga, laser počne dodirivati površinu praška koja je sastavni dio traženog izratka, temperatura u tom području raste malo iznad točke taljenja te se prah počinje spajati u jednu cjelinu. Nakon što završi prvu razinu taljenja, bazna ploča se spusti, 3D printer ponovo raznese prah te se ide u drugu fazu taljenja. Postupak se ponavlja sve dok proizvod nije gotov. Bazna ploča se svaki puta spusti za debljinu prethodno taljenog sloja te čini nultu razinu za novu fazu taljenja. [35]

Na slici 23. može se vidjeti, korak po korak, kako se gradi proizvod 3D DMLS tehnologijom.

Vidljivo je da se proizvod gradi sloj po sloj, takav pristup izradi proizvoda omogućuje stvaranje najkompleksnijih oblika te omogućuje izradnju proizvoda kakve je nemoguće proizvesti na konvencionalan, klasičan način izrade.

Neki od proizvoda rađenih 3D printanjem, a koje je nemoguće proizvesti klasičnim tehnologijama prikazani su na slikama 24 i 25.



Slika 21. Princip rada 3D printera



Slika 22. Kompleksni proizvodi izrađeni 3D DMLS-om [35,36,37]

7.3. Izrada zupčanika aditivnim tehnologijama

Unutar ovog potpoglavlja dati će se koraci izrade proizvoda aditivnim tehnologijama. Kako su aditivne tehnologije relativno nova tehnologija podatke o vremenima izrade nije jednostavno dobiti. U vrijeme pisanja ovog rada nije postojala literatura pomoću koje bi se mogla izvaditi procijenjena vremena izrade kao što je to slučaj za proizvodnju konvencionalnim metodama.

Stoga, redoslijed operacija te procijenjena vremena izrade dobivena su iz stvarne proizvodnje. U suradnji sa tvrtkom MARSi iz Slovenije dobiven je redoslijed operacija izrade zupčanika te su procijenjena vremena izrade zupčanika 3D DMLS tehnologijom 3D printanja.

7.3.1. Tvrtka MARSi [38]

Tvrtka MARSi nalazi se u Brežicama u Sloveniji (www.marsi.si). Tvrtka se primarno bavi proizvodnjom proizvoda od plastike te 3D printanjem metala tehnologijom DMLS. Područja rada kojima se tvrtka bavi su:

- izrada alata za brizganje plastike,
- reparatura alata,
- izrada alata za injekcijsko prešanje, hladni kanali,
- izrada alata za injekcijsko prešanje toplih i hladnih kanala,
- izrada alata za tlačno lijevanje pod tlakom,
- izrada alata za gume,
- izrada lamela za gume,
- „rapid tooling“,
- "Rapid prototyping".

Tvrtka svoje proizvode isporučuje u neke od najjačih europskih industrijskih zemalja poput Austrije, Njemačke i Poljske. Jednako tako po potrebi surađuju i sa tvrtkama u ostalim europskim zemljama.

Proizvodnja aditivnim tehnologijama tvrtki omogućuje veliku fleksibilnost prilikom izrade proizvoda.

7.3.2. Tehnološki proces izrade zupčanika DMLS tehnologijom

Kao što je ranije rečeno, ne postoje dostupni podaci koji na adekvatan način odvajaju pomoćna vremena izrade i tehnološka vremena izrade aditivnim tehnologijama. Stoga je pomoć morala biti potražena u stvarnoj proizvodnji. Tvrtka MARSi s kojom se surađivalo u sklopu ovog diplomskog rada, posjeduje stroj EOSINT M280 na kojemu bi se mogao izrađivati zupčanik. Proizvod bi bio rađen od praškastog čelika EOS MS1 martenzitnog čelika. U suradnji sa gosp. Maticom Vogrinom, stručnjakom za izradu proizvoda 3D printanjem u tvrtki MARSi, formiran je tehnološki proces izrade zupčanika te je izračunato ukupno vrijeme izrade proizvoda 3D printanjem.

Kako u ovom trenutku tvrtka printa samo materijal MS1 koji nije nehrđajući te nije moguće dobiti podatke za printanje nekog od nehrđajućih čelika, podaci dobiveni za MS1 smatrati će se dovoljno dobrima.

Tablica 7.3. Redoslijed operacija izrade zupčanika - 3D printanje

ADITIVNE TEHNOLOGIJE (vremena su prikazana u minutama)	
10) 3D printanje	
Stroj: EOSINT M280	
$t_{pz} = 270$	$t_{pz,uk} = 270$
$t_p = 19,32$	$t_t = 1900,68$
$t_c = 1920$	
20) Toplinska obrada - kaljenje	
30) Brušenje	
Stroj: Okuma GA25Wx400	
$t_{pz} = 30$	$t_{pz,uk} = 36$
$t_p = 1,21$	$t_t = 3,14$
$t_c = 5,22$	
40) Brušenje	
Stroj: GA25Wx400	
$t_{pz} = 30$	$t_{pz,uk} = 36$
$t_p = 0,29$	$t_t = 0,4$
$t_c = 0,83$	
50) Brušenje zubi	
Stroj: Liebherr LGG 180	
$t_{pz} = 90$	$t_{pz,uk} = 108$
$t_p = 0,22$	$t_t = 18,59$
$t_c = 22,57$	

Operacija 3D printanja može se podijeliti u faze:

- 10) Izrada/zaprimanje STL file-a
- 20) Popravljanje file + definiranje supporta
- 30) Razdvajanje STL file-a u dva file – posebno support, posebno komad
- 40) Prebacivanje STL file-ova u "slice" verziju . „Slice“ verzija pobliže se objašnjena je unutar poglavlja 3.2.
- 50) Printanje
- 60) Odstranjivanje viška materijala sa osnovne ploče
- 70) Micanje ploče iz stroja
- 80) Odstranjivanje komada
- 90) Pomoćna obrada na komadu,
- 100) Čišćenje ploče

Ukoliko se promatraju faze unutar operacije 3D printanje može se napraviti podjela na faze koje služe pripremno-završnom dijelu proizvodnje te faze za koje se smatra da su dio vremena ciklusa izrade.

Faze koje pripadaju pripremno-završnoj fazi su (ukupno trajanje 4,5h):

- 10) Izrada/zaprimanje STL file-a
- 20) Popravljanje file + definiranje supporta
- 30) Razdvajanje STL file-a u dva file – posebno support, posebno komad
- 40) Prebacivanje STL file-ova u slice verziju – razbijanje modela na slojeve pogodne za printanje.

Faze za koje se smatra da su dio vremena ciklusa izrade su (Ukupno trajanje operacije 50, 32h):

- 50) Printanje
- 60) Odstranjivanje viška materijala sa osnovne ploče
- 70) Micanje ploče iz stroja.
- 80) Odstranjivanje komada
- 90) Pomoćna obrada na komadu
- 100) Čišćenje ploče.

Kako faze od 60-100 uzimaju relativno malo vremena u odnosu na fazu 50, za potrebe ovog rada prebačene su u pripremno-završnu fazu te se za računanje vremena ciklusa uzela samo faza 50 koja se odnosi na printanje materijala. Takva preinaka je napravljena jer je teško odrediti tehnološko i pomoćno vrijeme za te operacije. Ovisi o izratku koji se izrađuje, a nisu dostupni podaci koji bi dali adekvatnu procijenu.

Faze 60, 70, 80 i 100 mogu pripadati pripremno-završnom vremenu, ali i pomoćnom vremenu. Ovisi o tome da li se izrađuje serija proizvoda ili se izrađuje samo jedan komad. Unutar ovog rada postaviti će se u pripremno-završno vrijeme jer će se kasnija analiza vršiti za izradu jednog komada.

Stroj sam, pomoću računalnog softvera Materialise Magic, računa ukupno vrijeme izrade komada što znači da se pomoćno i tehnološko vrijeme moraju posebno ručno izračunati. Kao pomoćna radnja uzeto je nanašanje praška pomoću valjka na baznu ploču. Bazna ploča dugačka je 550mm, a brzina valjka je 30m/s. Iz toga proizlazi da se u svakom prolazu valjka preko bazne ploče gubi 0,0183s.

$$v = \frac{s}{t} \rightarrow t = \frac{s}{v}$$

$$t = \frac{s}{v} = \frac{0,55m}{30m/s} = 0,0183s$$

Prašak se nanosi u debljini od 40μm, širina zupčanika je 39mm te dodatno treba dodati 3,24mm materijala koji služe kao support prilikom izrade. Iz toga proizlazi da valjak preko bazne ploče treba proći 1056 puta.

$$broj\ slojeva = \frac{debljina\ zupcanika + support}{debljina\ nanesenog\ sloja} = \frac{42240}{40} = 1056$$

Ako se pomnoži broj prolaza sa vremenom prolaska valjka dobije se ukupno pomoćno vrijeme od 19,32min.

$$t_p = broj\ slojeva \cdot t_s = 1056 \cdot 0,0183 = 19,32s$$

Pomoćno vrijeme iznosi 19,32s ondonso 0,032min te je zanemarive veličine u odnosu na tehnološko vrijeme.

7.4. Teorijsko stablo odlučivanja

Odabir kriterija za stablo odlučivanja nikako nije jednostavan zadatak. Vrlo je bitno da se odaberu adekvatni kriteriji koji imaju svoju podlogu na znanstvenoj razini. Razlozi tomu su višestruki. Prije svega, pogrešan odabir kriterija može dovesti i do pogrešnih rezultata odlučivanja, a samim time i do velikih financijskih gubitaka. Osim toga, pogreška prilikom odabira kriterija može zakomplicirati i samo donošenje odluka. Mogućnost da se vrijednost nekog kriterija teško odredi ili da ga se teško može komparirati s drugima može dovesti do zbunjenosti, kako onog koji odlučuje, tako i onoga koji bi eventualnom kasnijom analizom pokušao iščitavati određene podatke.

Iz tih razloga, za definiranje adekvatnih kriterija prilikom odabira načina proizvodnje bilo je potrebno proučavati literaturu te interetskih sadržaje kako bi se odvagalo što je od kriterija i njihovih podkriterija bitno, a što je manje bitno ili nebitno. Svi odabrani kriteriji i njihovi podkriteriji biti će obrazloženi unutar ovog podnaslova.

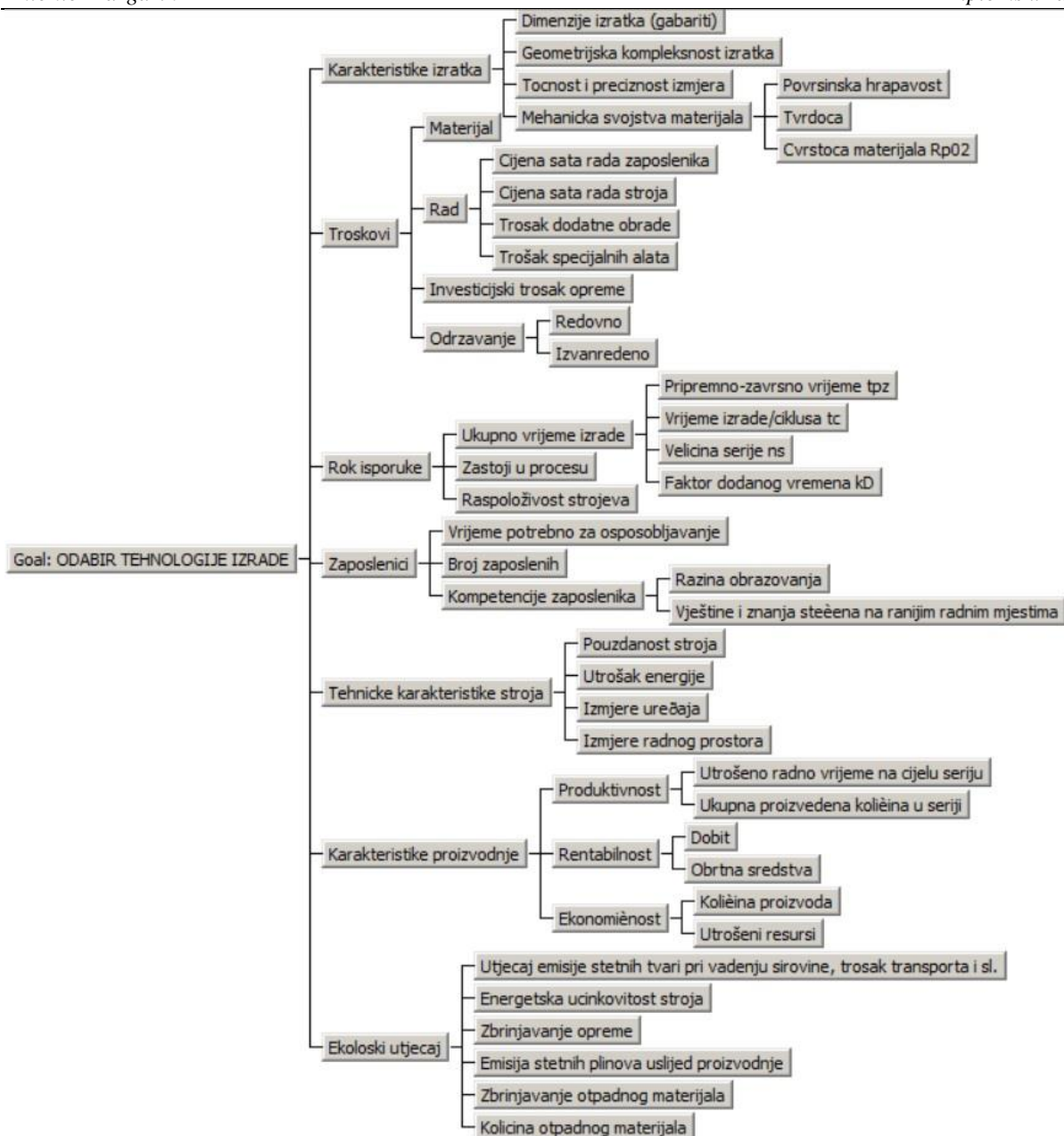
Prilikom formiranja teorijskog stabla odlučivanja uzeti su svi kriteriji za koje se, ustanovilo da su relevantni prilikom odabira tehnologije izrade.

Teorijsko stablo je prošireno, uzima u obzir više kriterija nego modificirano te je za njegovu primjenu potrebno puno više podataka uzeti u zahtijeva više znanja i vremena da bi se na adekvatan način upotrijebilo. Uporaba takvog stabla davala bi preciznija rješenja, mogućnosti za detaljniju analizu te samim time i relevantniju podlogu za odlučivanje. Ono što karakterizira teorijsko stablo odlučivanja, u odnosu na modificirano, je činjenica da bi za njegovu adekvatnu upotrebu trebali imati puno veću količinu podataka koje bi trebalo kroz duži vremenski period skupljati te vršiti zasebnu analizu na njima..

Jednako tako, neke podatke iz teorijskog stabla dosta je teško prikupiti te bi morale biti rađene i-specijalne analiza kako bi se podaci mogli smatrati primjerenima. To nadilazi opseg zadanog zadatka. Kao jedan od primjera može se uzeti kriterij ekološkog utjecaja za čiju je adekvatnu procjenu potrebna detaljna LCA(Life Cycle Assessment) analiza koja bi, sama po sebi, mogla biti tema za neki drugi rad.

U skladu sa tim saznanjima, formirano je teorijsko stablo, svjesno su u obzir uzeti kriteriji i podkriteriji za koje je potrebno puno više informacija, ali takvo stablo moglo bi biti dobar temelj i za neki znanstveni rad.

Teorijsko stablo prikazano je na slici 25.



Slika 23. Teorijsko stablo odlučivanja

7.4.1. Obrazloženje kriterija i podkriterija teorijskog stabla

Kod odabira kriterija i podkriterija za stablo odlučivanja potrebno je biti posebno oprezan. Svaki kriterij i podkriterij mora biti pažljivo odabran kako bi rezultati na kraju bili čim bolji. U ovom podnaslovu ukratko će se objasniti odabir svakog kriterija i podkriterija kako bi se čitatelju pojasnilo iz kojeg su razloga odabrani.

➤ **KARAKTERISTIKE IZRATKA**

Karakteristike izratka vrlo su bitan kriterij i o njima uvelike može ovisiti odabir tehnologije. Kako su danas mogućnosti 3D printera još uvijek ograničene, vrlo je važno odrediti koliki utjecaj imaju značajke određenog izratka na odabir tehnologije.

Kao podkriteriji kriterija *karakteristike izratka* uzeti su:

- *Dimenzije izratka(gabariti)* – o veličini proizvoda ovisiti će i odabir tehnologije. Aditivne tehnologije još uvijek su ograničenih mogućnosti te ne mogu izrađivati proizvode svih veličina.
- *Geometrijska kompleksnost izratka* - predstavlja opisne karakteristike proizvoda, odnosno činjenicu koliko je proizvod kompleksan za proizvodnju. Da li ga je moguće uopće izrađivati klasično ili ga je jedino aditivnim tehnologijama moguće proizvoditi. Primjeri takvih proizvoda dani su na slici 24.
- *Točnost i preciznost izmjera* – isto vrijedi kao za površinsku hrapavost.
- *Mehanička svojstva materijala* – vrlo je važno da je materijal zadovoljavajuće kvalitete jer inače proizvod nema nikakvu funkciju.
 - *Površinska hrapavost* – površinska hrapavost bitna je radi naknadne obrade. Uspoređujući traženu površinsku hrapavost proizvoda sa ostvarivim površinskim hrapavostima dobivenih 3D printanjem, odnosno klasičnim tehnologijama dobijemo informaciju da li je, i u kojoj mjeri, potrebna dodatna obrada proizvoda.
 - *Tvrdoća* – kako su materijali za 3D printanje još uvijek u razvoju te je spektar materijala koje je moguće obrađivati klasičnim tehnologijama puno veći, potrebno je usporediti karakteristike tih materijala. Materijali koji se koriste kod 3D printanja svojim karakteristikama mogu biti lošiji, ali i bolji, od traženih zahtjeva. Stoga, možda će biti potrebna dodatna obrada da bi se materijal doveo na zahtjevanu razinu. Tvrdoća se promatra s aspekta karakteristike materijala izratka, odnosno, uspoređuju se maksimalne moguće tvrdoće dobivene 3D printanjem te konvencionalnim tehnologijama s aspekta izrade određenog proizvoda.
 - *Čvrstoća materijala R_{p02}* – vrijedi isto kao i za tvrdoću.

➤ **TROŠKOVI**

Troškovi su vrlo bitan faktor, ne samo u proizvodnji, već u svakodnevnom životu. Smanjenje troškova omogućuje ostvarivanje većeg profita te veći manevarski prostor po pitanju postavljanja cijena. Na taj način ostvaruje se i konkurentska prednost na tržištu. Tržište diktira cijene. Stoga je vrlo važno znati upravljati troškovima te ih svoditi na što je moguće nižu razinu.

Kao podkriteriji kriterija troškovi uzeti su troškovi:

- *Materijala* – gleda se trošak materijala po kg.
- *Rada* – dijeli se na cijenu sata rada zaposlenika, cijenu sata rada stroja, na trošak dodatne obrade te troškove specijalnih alata. Troškovi rada ovise o izgledu proizvoda, njegovim dimenzijama, tolerancija itd.
- *Investicijski trošak opreme* – cijena stroja može imati značajnu ulogu prilikom odabira tehnologije. U obzir se uzima ukupna cijena stroja, sve prateće opreme potrebne te edukacije zaposlenika da bi se proizvod uopće mogao proizvoditi.
- *Održavanje* – trošak održavanja na godišnjoj razini ovisi o puno faktora te se može dijeliti na redovne i izvanredne troškove. Na izvanredne je teško utjecati te bi se eventualnim prediktivnim održavanjem mogli procijenjivati. Kako malo tvrtki radi na tom principu, trošak izvanrednog održavanja mogao bi se procijenjivati samo dugogodišnjim praćenjem te analizom troškova.

➤ **ROK ISPORUKE**

Kupac želi svoj proizvod dobiti na dogovoreno vrijeme. Stoga je rok isporuke vrlo važna karakteristika prilikom odabira tehnologije.

Kao podkriteriji kriterija rok isporuke uzeti su:

- *Ukupno vrijeme izrade* – dijeli se na pripremno-završno vrijeme t_{pz} , vrijeme izrade/ciklusa t_c , veličinu seriju n_s te faktor dodanog vremena k_d . Takva podjela vremena proizlazi iz formule za komadno vrijeme t_l koja bi u ovom slučaju bila formirana za računanje vremena izrade cijele serije t_{ns} . Na ovaj način može se promatrati što se događa ukoliko se neki od tih faktora promijeni. Vrijeme ciklusa t_c u teoriji se dijeli na pomoćno vrijeme t_p i tehnološko vrijeme t_t . Vrijeme ciklusa naziva se još i vrijeme obrade i odnosi

se na sva ona vremena koja se pojavljuju od početka izrade proizvoda do vađenja proizvoda iz stroja. [39]

$$t_{ns} = t_{pz} + n_s * (I + k_d) * (t_p + t_t)$$

gdje je

$$(t_p + t_t) = t_c$$

- *Zastoji u procesu* – vrlo je važno pratiti koliki je broj zastoja u radu prilikom izrade određenog proizvoda. Zastoji mogu biti planirani i neplanirani te bi za konkretne brojeve trebalo voditi bilješke te provesti statističke analize kako bi se taj faktor mogao na adekvatan način iskoristiti. Često takvi zastoji ovise i o vrsti i kvaliteti stroja na kojem se proizvod izrađuje.
- *Raspoloživost strojeva* – također jedan značajan faktor koji može imati snažan utjecaj na rok isporuke. O trenutnom stanju na proizvodnim linijama može uvelike ovisiti i rok isporuke. Stoga planiranje proizvodnje mora biti vrlo dobro razrađeno kako bi proizvod bio isporučen na vrijeme.

➤ **ZAPOSLENICI**

Zaposlenici su sastavni dio svake tvrtke i vrlo su bitan faktor proizvodnje. Zanimljivo bi bilo promatrati koliki utjecaj zaposlenici imaju na odabir tehnologije izrade. Ovaj kriterij je dosta teško kvantificirati te bi trebalo osmisliti metodologiju kojom bi se mogle ostvarivati adekvatne procjene. Ali svakako, ovaj kriterij nije zanemariv prilikom odabira tehnologije izrade.

Kao podkriteriji uzeti su:

- *Vrijeme potrebno za osposobljavanje* – ovaj faktor se odnosi na vrijeme potrebno za ospoboljavanje radnika za rad. Primjera radi, školovanje radnika za rad na 3D printeru može trajati i do šest mjeseci, dok operater na CNC stroju svoj posao može naučiti u puno kraćem periodu.
- *Broj zaposlenih* – ovaj kriterij bi se odnosio na potreban broj zaposlenih da bi se proizvod izradio. Na primjer, za rad na 3D printeru potreban je samo jedan radnik, programer, dok za CNC stroj trebamo imati i programera i operatera. Najčešće nakon CNC stroja slijedi niz dodatnih operacija, dok 3D printer sve

te operacije odradi odjednom. Stoga bi u ukupan broj zaposlenih ušao zbroj svih radnika u lancu koji rade na proizvodu, od priprema do gotovog proizvoda. Na taj način vidjelo bi se koliko se ljudski resursa, a na taj način i novčanih, troši na određeni proizvod.

- *Kompetencije zaposlenika* – možda najbitniji faktor ovog kriterija. Kolika je potrebna razina obrazovanja da bi radnik mogao raditi na određenom stroju. Jednako tako, da li su vještine i znanja stečena na ranijim radnim mjestima ključne za rad na stroju ili to nije presudno. Dosta teško kvantificiran podkriterij ali nije zanemariv.

➤ **TEHNIČKE KARAKTERISTIKE STROJA**

Karakteristike stroja također su jedan od faktora koji utječu na odabir proizvodnje. Ukoliko se proizvodne karakteristike izratka neće značajno razlikovati, bilo da se radilo o 3D printanom proizvodu ili o proizvodu izrađenim klasičnim tehnologijama, prevagu mogu raditi upravo tehničke karakteristike stroja.

Kao podkriteriji uzeti su:

- *Pouzdanost stroja* – vrlo bitan faktor koji je lako kvantificirati.
- *Utrošak energije* – čim manje energije stroj troši tim bolje. Mjeri se u kWh/kom.
- *Izmjere uređaja* – često je prostor ograničavajuć faktor i stoga je vrlo bitno koliko je uređaj velik. Svaki kvadrat prostora košta te je i s te strane bitna veličina uređaja. Jednako tako, veličina izmjera uvjetuje i veličinu izratka koji se može na njemu izrađivati.
- *Izmjere radnog prostora* – isto kao za izmjere uređaja, samo se ovdje radi o prostoru koji je potreban radniku da bi na adekvatan način mogao obavljati posao.

➤ **KARAKTERISTIKE PROIZVODNJE**

Cilj svake proizvodnje je da bude čim produktivnija, rentabilnija te da bude ekonomična. Stoga su te tri karakteristike uzete kao podkriteriji ovog kriterija.

Kao podkriteriji uzeti su:

- *Produktivnost* – važno je znati koliko se radnog vremena utroši na cijelu seriju te kolika je ukupna količina proizvedena u jednoj seriji.
- *Rentabilnost* – kako bi se dobila informacija o rentabilnosti važno je znati kolika je dobit po proizvodu te koliko se obrtnih sredstava potroši na izradu istog.
- *Ekonomičnost* – količina proizvoda te utrošeni resursi na proizvodnju bitni su da se izračuna ekonomičnost proizvodnje.

➤ **EKOLOŠKI UTJECAJ**

Kako se već poodavno govori o utjecaju proizvodnje na prirodu i ekološki sustav, te kako se pojavljuju sve strože regulative po pitanju ekologije, uvođenje ovog kriterija smatra se opravdanim. Uostalom, često je primjena grupe ISO stadarda 14 xxx uvjet dobivanja posla (primjer Dalekovoda i posla u Norveškoj).

Kao podkriteriji uzeti su:

- *Utjecaj emisije štetnih tvari pri vađenju sirovine, trošak transporta i sl.*
- *Energetska učinkovitost stroja,*
- *Zbrinjavanje opreme,*
- *Emisija štetnih plinova uslijed proizvodnje (voda, tlo, zrak),*
- *Zbrinjavanje otpadnog materijala te*
- *Količina otpadnog materijala.*

Za sve ove ekološke podkriterije potrebne su detaljne analize. Trebalo bi se težiti tomu da proizvodnja bude s višim stupnjem održivosti, sa manje otpada, manje štetnih plinova, a to često zahtijeva i velike financijske investicije. Dosta nezahvalno, sa stajališta proizvođača, imati ekološku proizvodnju. S druge strane treba napomenuti da je društvena odgovornost vrlo bitna te tu činjenicu uvijek treba imati na umu. Važno je razmišljati o idućim generacijama koje će hodati Zemljom. Jednako tako ekološka proizvodnja može biti dobar marketinški trik prilikom prodaje proizvoda stoga će ju poduzeća sve više morati uzimati u obzir. Ali zanemarilo se utjecaj svijesti javnosti (društvena odgovornost), te svijesti naručitelja o potrebi primjene kriterija održive proizvodnje. Kriteriji su već ugrađeni u puno ISO normi, zakona HR, dekreta

EU i slično. Dakle, manja je konkurentnost ako se kriterije održive proizvodnje ne primjenjuje. Konkurenti bi mogli napadati one koji ih ne primjenjuju jer rade s nižim troškovima proizvodnje.

U ovom radu navedeni su oni kriteriji za koje se smatralo da će na što jednostavniji način obuhvatiti sve važne dijelove proizvodnje. Teškoće proizlaze iz nedostatka znanja iz održive proizvodnje i nedostatku vremena kandidata.

Ovo teorijsko stablo rađeno je kako bi se olakšalo stvaranje modificiranog stabla kriterija koje će se koristiti unutar ovog diplomskog rada. Jednako tako, teorijsko stablo može biti dobra početna točka ekspertu prilikom razvoja stabla kriterija koje bi se moglo koristiti u svakodnevnoj primjeni unutar realne proizvodnje.

7.5. Modificirano stablo odlučivanja

Ovdje se polazi od činjenice da se proizvod radi u virtualno zamišljenom pogonu te je stablo prilagođeno onim podacima koje je u ovome trenu i razini znanja moguće prikupiti.

Kako stablo odlučivanja sadrži kriterije i podkriterije za čiju su kvantifikaciju potrebni podaci koji spadaju u sferu poslovne tajne moguća su odstupanja u odnosu na stvarne podatke, ali će za potrebe ovog rada takvi podaci biti dovoljno dobri.

U modificiranom stablu kao kriteriji, iz teorijskog stabla, uzeti su:

- karakteristike izratka,
- troškovi,
- ukupno vrijeme izrade i
- produktivnost.

U odnosu na teorijsko stablo, došlo je do nekoliko promjena unutar modificiranog stabla, a sve kako bi se dostupni podaci mogli iskoristiti što je moguće bolje.

Po pitanju karakteristika izratka ništa se nije promijenilo.

U kriterij troškova ubačen je trošak otpadnog materijala te energetska trošak stroja, dok su izbačeni investicijski trošak opreme te troškovi održavanja. Investicijski trošak opreme izbačen je jer se u modificiranom stablu kreće od pretpostavke da se proizvod radi u virtualnom zamišljenom pogonu koji posjeduje sve potrebne strojeve. Isto vrijedi i za

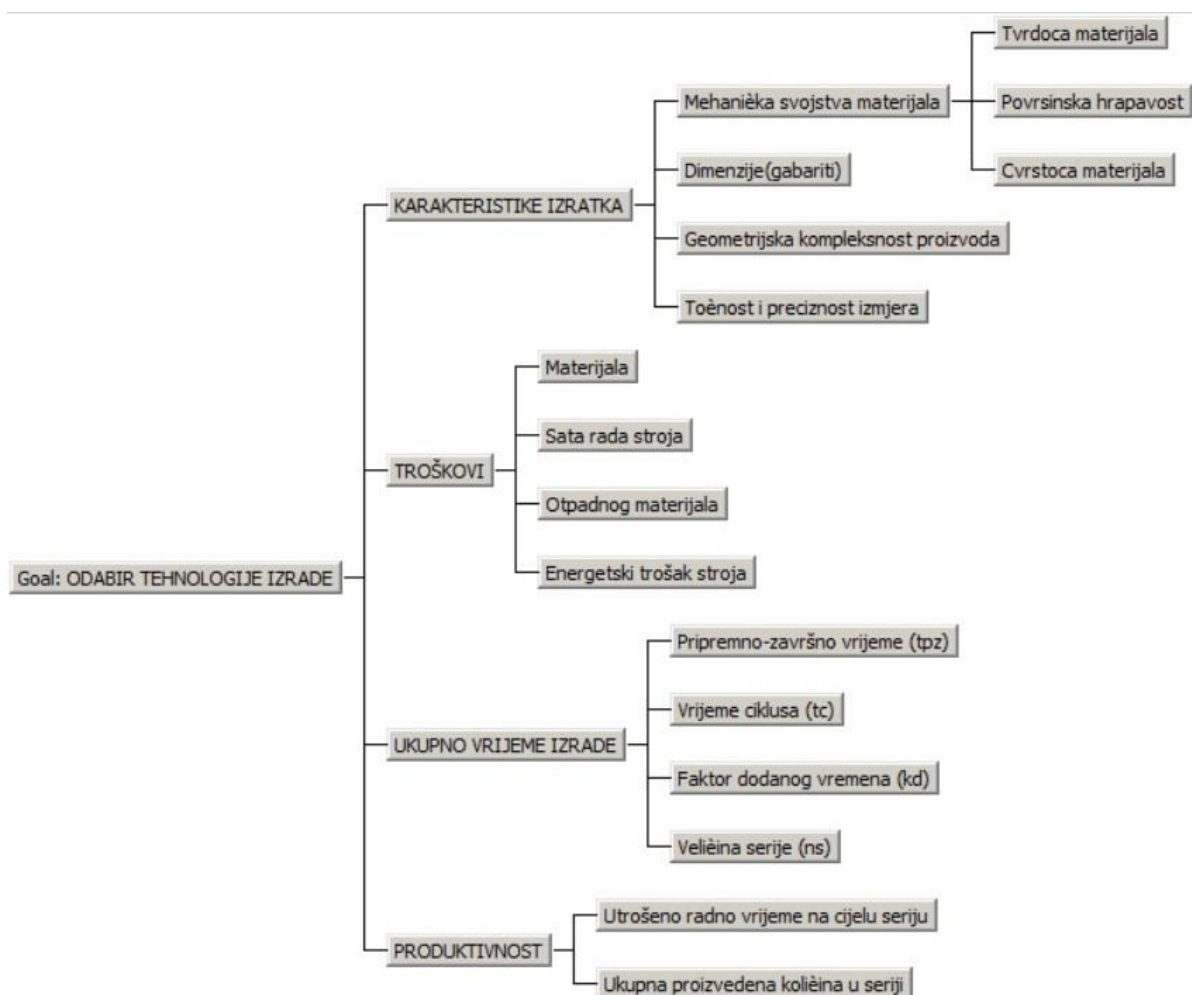
troškove održavanja. Trošak specijalnih alata je izbačen jer za izradu ovog zupčanika ne trebaju posebni alati.

Kriterij ukupno vrijeme izrade proizašao je iz kriterija rok isporuke. Podatke o zastojima u procesu te raspoloživosti strojeva teško je prikupiti te je njihov utjecaj u ovom radu zanemaren iako bi u stvarnoj proizvodnji njihov utjecaj bio poprilično značajan.

Iz kriterija karakteristike proizvodnje izvučen je kriterij produktivnosti jer je procijenjeno da je najvažniji od sve tri karakteristike te je jedino podatke za njega moguće prikupiti.

Ostali su kriteriji izbačeni su zbog nemogućnosti dobivanja adekvatnih podataka.

Modificirano stablo odličivanja prikazano je na slici 26.



Slika 24. Modificirano stablo odlučivanja

7.6. Priprema podataka za odabir varijante izrade

U ovom poglavlju prikazati će se podaci, u tablici, koji će biti polazna točka za ocijenjivanje kriterija unutar softvera Expert Choice.

Prilikom pripreme podataka zaključilo se da će se tehnološki proces izrade klasičnim tehnologijama i aditivnim tehnologijama razlikovati samo u početnoj fazi izrade. Ako se pogledaju tablice 7.2. i 7.3. može se primijetiti da su procesi različiti do operacije kaljenja te da s operacijom kaljenja počinje identičan proces obrade. Stoga, podaci će se pripremati za početni dio tehnološkog procesa izrade. Odnosno, birati će se da li je proizvod isplativije printati samo na stroju za aditivnu proizvodnju i pri tome koristiti samo jedan stroj ili je isplativije prvo tokariti i bušiti na obradnom centru pa glodati na CNC glodalici te pri tome koristiti dva stroja. U skladu sa spoznajom o sličnosti tehnoloških procesa podaci će se pripremati samo za početni dio proizvodnje, dok se za ostale operacije može smatrati da neće imati preveliki utjecaj na odabir tehnologije izrade.

Dijelovi procesa za koji je rađena analiza izvađeni su iz tablice 7.2. i 7.3. te su prikazani u tablici 7.4.

Tablica 7.4. Dio proizvodnje za koji su pripremani podaci

CNC (vremena su prikazana u minutama)	
OBRADA NA OBRADNOM CENTRU	
Stroj: HAAS ST-20Y	
Tpz je zajednički za sve operacije unutar ovog obradnog centra	
$t_{pz} = 50$	$t_{pz,uk} = 60$
10) TOKARENJE	
$t_p = 0,84$	$t_t = 1,09$
$t_c = 2,32$	
20) Bušenje $\phi 5 \times 20$	
$t_p = 0,17$	$t_t = 0,27$
$t_c = 0,53$	
30) Bušenje $\phi 8 \times 20$	
$t_p = 0,17$	$t_t = 0,21$
$t_c = 0,46$	
35) Upuštanje $\phi 14 \times 10$	
$t_p = 0,17$	$t_t = 0,1$
$t_c = 0,32$	
OBRADA NA OBRADNOM CENTRU	
Stroj: HAAS ST-20Y	
Tpz je zajednički za sve operacije unutar ovog obradnog centra	
$t_{pz} = 40$	$t_{pz,uk} = 48$
40) Tokarenje	
$t_p = 1,8$	$t_t = 2,14$
$t_c = 4,72$	

50) Bušenje $\phi 8 \times 5$	
$t_p = 0,17$	$t_t = 0,08$
$t_c = 0,3$	
60) Glodanje zubi	
Stroj: LIEBHERR LC 180	
$t_{pz} = 35$	$t_{pz,uk} = 42$
$t_p = 0,51$	$t_t = 17,76$
$t_c = 21,92$	
70) Skidanje srha od glodanja	
Stroj: LIEBHERR LC 180	
$t_{pz} = 20$	$t_{pz,uk} = 24$
$t_p = 0,12$	$t_t = 1,46$
$t_c = 1,90$	
ADITIVNE TEHNOLOGIJE (vremena su prikazana u minutama)	
10) 3D printanje	
Stroj: EOSINT M280	
$t_{pz} = 270$	$t_{pz,uk} = 270$
$t_p = 19,32$	$t_t = 1900,68$
$t_c = 1920$	

Predmet promatranja su operacije tokarenja, bušenja i glodanja koje se obavljaju na tokarskom obradnom centru te CNC glodalici, odnosno operacija 3D printanja koja se vrši na stroju za DMLS 3D printanje.

Podaci o karakteristikama materijala i točnosti izrade koji se koriste kod klasičnih tehnologija dobivane su iz izvora [40], [41], [42] dok su za aditivne tehnologije podaci preuzeti iz dokumentacije tvrtke MARSi [43].

Cijene i troškovi za aditivne tehnologije dobiveni su u neformalnom razgovoru s predstavnicima tvrtke MARSi, dok su cijene za klasične strojeve dobivene iskustveno.

Količina otpadnog materijala kod konvencionalnih tehnologija izrade dobivena je pomoću programa Solidworks. Nacrtan je otovak te je izračunata njegova masa, oduzeta je masa gotovog zupčanika te je na taj način dobivena količina otpadnog materijala. Procjena količine otpadnog materijala kod aditivnih tehnologija dobivena je od strane tvrtke MARSi.

Podaci o energetske troškovima stroja dobiveni su sa službenih stranica proizvođača strojeva. [44], [45], [46]. Za energetske trošak klasičnih strojeva uzeta je snaga tokarilica od 22,4kW te snaga glodalica koja iznosi 23kW te je prema vremenima trajanja operacija glodanja i tokarenja dobivena ukupna potrošena energija na izradu jednog komada. Za aditivne tehnologije pomnožena je snaga stroja sa vremenom trajanja operacije 3D printanja. Vremena izrade dobivena su iz tehnoloških procesa.

Pripremljeni i prikupljeni podaci, potrebni za odabir varijante izrade, prikazani su u tablici 7.5.

Tablica 7.5 Pripremljeni podaci za odabir varijante izrade

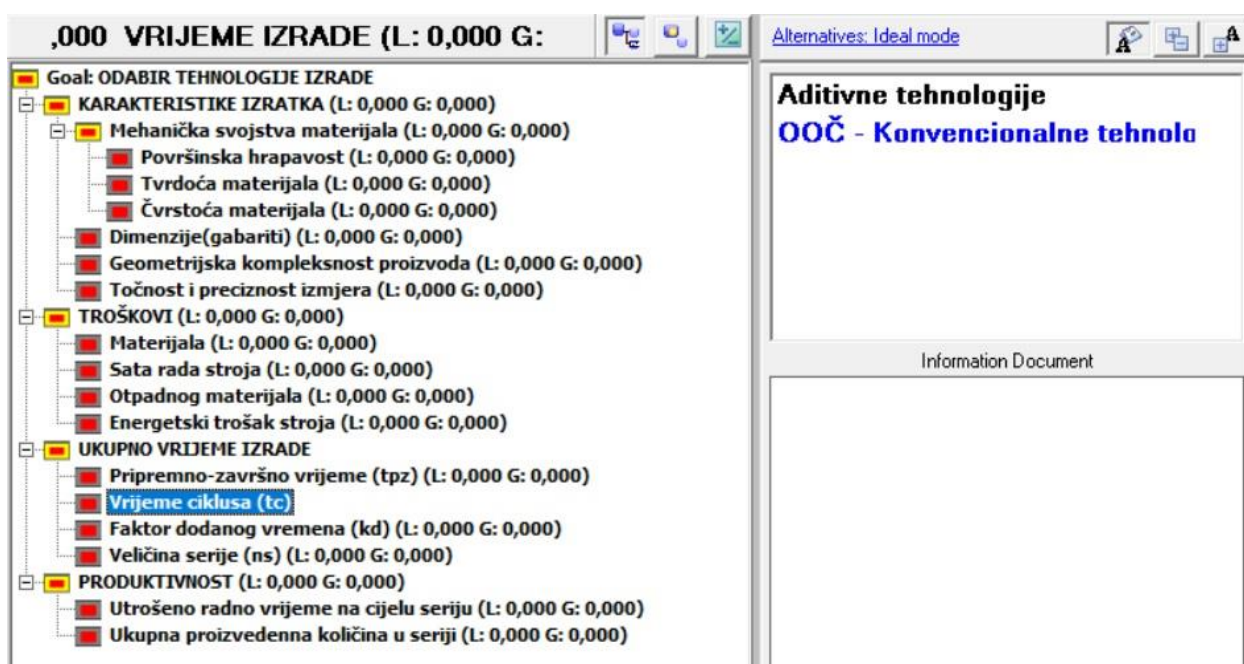
PODACI ZA ODABIR VARIJANTE IZRADE		
Podaci	Konvencionalne tehnologije – CNC	Aditivne tehnologije – DMLS
Masa izratka	2,5kg	
Površinska hrapavost Ra	1,6μm	5μm
Tvrdoća materijala	19 HRC	33-37 HRC
Čvrstoća materijala Rp02	600-800N/mm2	1000-1200 N/mm2
Modul elastičnosti E	2,1 * 10 ⁵ N/mm2	1,5 * 10 ⁵ N/mm2
Vlačna čvrstoća Rm	1100-1300 N/mm2	720 N/mm2
Točnost i preciznost izmjera	±20μm	±50μm
Cijena materijala /kg	4€	110€
Cijena sata rada stroja/h	60€ - 5 osni obradni centar 40€ - CNC glodalica	120€
Količina otpadnog materijala	1,1kg	10% mase izratka
Ukupni energetske trošak stroja za izradu jednog komada	11,63kW	102kW
Pripremno-završno vrijeme	2,5h	4h
Vrijeme ciklusa /kom	32,5min	32h
Faktor dodanog vremena	0,3	0,05
Veličina serije ns	Ista i varirati će u odnosu na različite situacije	

8. PRIKAZ I ANALIZA REZULTATA ODABIRA TEHNOLOGIJE IZRADE

Nakon izrade modificiranog stabla kriterija potrebno je provesti analizu unutar programa Expert Choice. Težine kriterijima i podkriterijima dodane su u skladu sa pripremljenim podacima u poglavlju 7. Onim podacima koje nije bilo moguće kvantificirati dodane su vrijednosti koje su proizašle iz *brainstorminga* (Godec, Ćosić, Trstenjak, MARSi).

8.1. Postavljanje modela unutar softvera

Modificirano stablo trebalo je prenijeti u softver Expert Choice. Unutar softvera potrebno je definirati cilj, dodati kriterije te njihove podkriterije te na kraju dodati alternative. Postavljeno stablo unutar softvera prikazano je na slici 27.



Slika 25. Modificirano stablo unutar softvera Expert Choice

8.1.1. Ponderiranje kriterija

Nakon što je stablo postavljeno potrebno je dodati težine kriterijima i podkriterijima.

Kriteriji poredani po prioritetima rezultat su *brainstorminga* te su navedeni prema važnosti, od najvažnijeg do najmanje važnog:

- 1) Troškovi izrade,
- 2) Ukupno vrijeme izrade,
- 3) Karakteristike izratka te
- 4) Produktivnost.

Prilikom dodjeljivanja težinskih faktora kriterijima i podkriterijima polazilo se sa stajališta proizvođača te se pokušalo iz toga ugla promatrati proizvodnju.

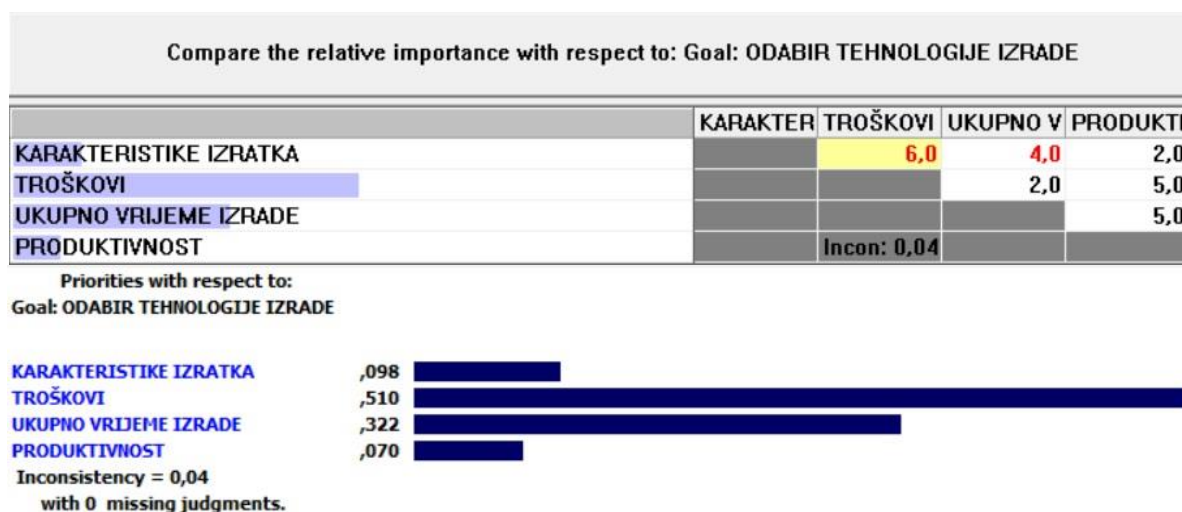
Troškovi izrade postavljeni su kao najznačajniji kriterij jer su oni sa stajališta proizvodnje najbitniji. U proizvodnji se teži da troškovi proizvodnje budu čim niži jer se na taj način omogućuje veća zarada za tvrtku.

Kao drugi najvažniji kriterij označeno je ukupno vrijeme izrade. Iako je vrijeme izrade usko povezano sa troškovima izrade ta dva kriterija mogu se odvojiti. Razlog tomu je činjenica da za proizvođača nije toliko bitan rok isporuke koliko su bitni troškovi. Rok isporuke važniji je za kupca nego za proizvođača dok su troškovi važniji proizvođaču nego kupcu. Ta činjenica proizlazi iz moderne filozofije ostvarivanja zarade gdje cijena proizvoda mora biti fiksna dok se redukcijom troškova ostvaruje zarada.

Treći kriterij po važnosti je kriterij karakteristike izratka. Taj kriterij postavljen je kao treći jer se sa stajališta proizvođača podrazumijeva da izradak bude napravljen točno onakav kakav zahtijeva kupac i da zadovoljava tražene zahtjeve. Pošto su značajke materijala za 3D printanje još uvijek ograničene, postoji mogućnost da su mehanička svojstva tih materijala lošija od materijala za izradu konvencionalnim tehnologijama. Važno je stoga usporediti svojstva tih materijala. Karakteristike izratka su bitne, ali ne koliko troškovi ili vrijeme izrade.

Četvrti kriterij po važnosti je produktivnost. Ona posebice dolazi do izražaja kod serijske proizvodnje gdje je njen utjecaj vrlo važan. Kako će se ovdje promatrati manje serije produktivnost se može smatrati najmanje bitnom.

Postavljanjem težinskih faktora u Expert Choice-u dobili su se utjecaji određenih kriterija na konačan odabir alternative. Težinski faktori su prikazane na slici 28. Važno je primijetiti da je konzistencija 0,04 a to govori da su rezultati dobri.



Slika 26. Težinski faktori kriterija unuta Expert Choica

8.1.2. Ponderiranje podkriterija

Nakon ponderiranja kriterija važno je ponderirati i njihove podkriterije te im dodijeliti određene težine.

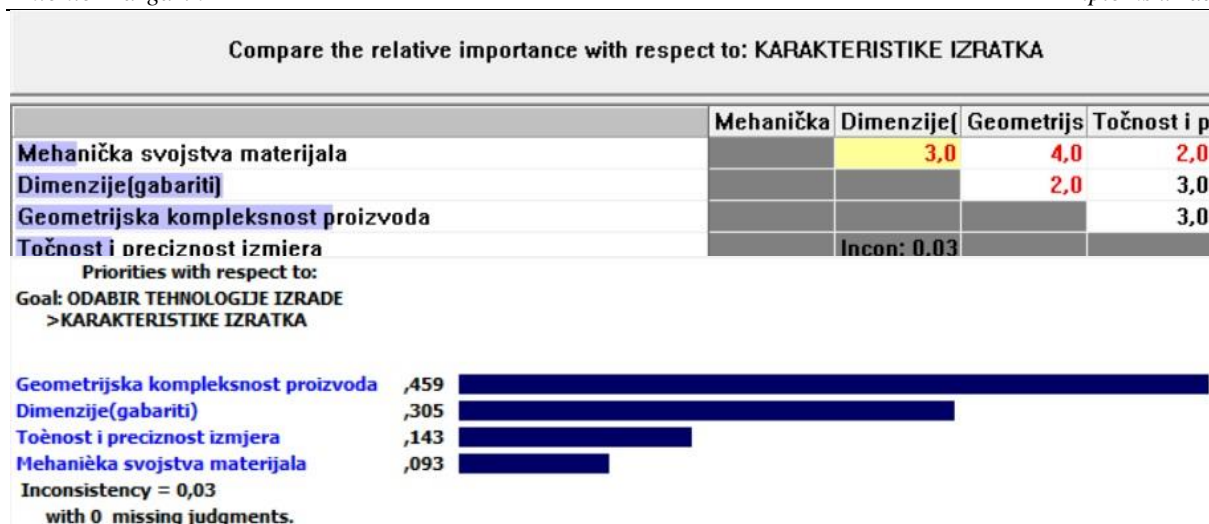
➤ KARAKTERISTIKE IZRATKA

Unutar ovoga kriterija nalaze se podkriteriji mehanička svojstva izratka, dimenzije (gabariti) izratka, geometrijska kompleksnost proizvoda i točnost i preciznost izmjera.

Kriteriji su ponderirani slijedećim redoslijedom, od najvažnijeg prema najmanje važnom:

- 1) Geometrijska složenost proizvoda,
- 2) Dimenzije (gabariti) izratka,
- 3) Točnost i preciznost izmjera,
- 4) Mehanička svojstva materijala.

Nakon postavljanja težinskih faktora dobiveni su rezultati prikazani na slici 29. Konzistencija je zadovoljavajuća.

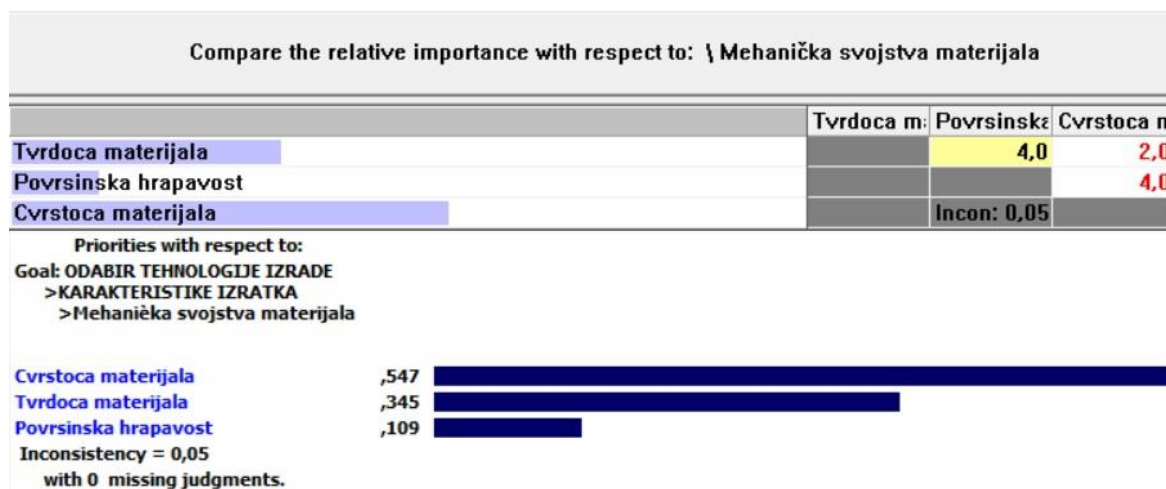


Slika 27. Težine podkriterija unutar kriterija karakteristike izratka

Podkriterij mehanička svojstva materijala dodatno je granan na tri podkriterija koje će se navoditi po važnosti.

- 1) Čvrstoća materijala,
- 2) Tvrdoca materijala te
- 3) Površinska hrapavost.

Težinski faktori podkriterijima i kriterijima dodijeljeni su prema prethodnim znanjima.. Čvrstoća ima najveću vrijednost s obzirom da se pomoću nje vrši proračun zupčanika, nakon toga tvrdoca te kao zadnja površinska hrapavost. Površinska hrapavost je ocijenjena kao najmanje „teška“ jer ju se dodatnom obradom može dovesti na koju god razinu želimo. Rezultati su prikazani na slici 30. Konzistencija je zadovoljavajuća.



Slika 28. "Težine "kriterija unutar podkriterija mehanička svojstva izratka

➤ TROŠKOVI

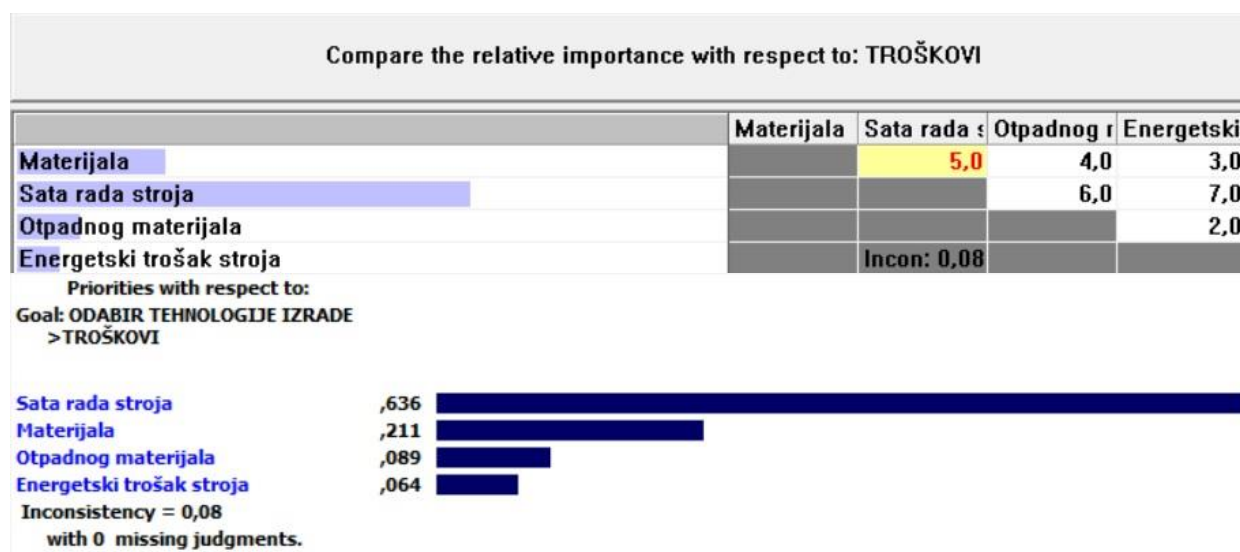
Unutar ovog kriterija nalazi se četiri podkriterija kojima je trebalo dodijeliti težine. Podkriteriji su navedeni u nastavku, od najbitnijeg do najmanje bitnog.

- 1) Trošak sata rada stroja,
- 2) Trošak materijala,
- 3) Trošak otpadnog materijala te
- 4) Energetski trošak stroja.

Nakon postavljanja "težina" dobiveni su rezultati prikazani na slici 31.

U radni sad stroja ulaze troškovi hladnog pogona te trošak stroja u radu. Trošak hladnog pogona uključuje troškove nabave, održavanja i popravka stroja, prostora te instalirane snage. Dok trošak stroja u radu uključuje troškove alata (reznih), potrošnog materijala i energije.[40] Trošak sata rada stroja smatra se najbitnijim jer je njegov utjecaj na konačnu cijenu proizvoda najveći, nakon toga slijede trošak materijala te trošak otpadnog materijala. Prati se koliko se materijala iskoristi, a koliko se pretvori u otpad. Otpadni materijal preračuna se u novac na način da se kilogram otpadnog materijala pomnoži sa cijenom otpadnog materijala te se prema tome dodijeli i „težina“ tom podkriteriju.

Energetski trošak stroja usko je povezan s vremenima izrade. Koliko se dugo proizvod radi toliko će energije stroj trošiti. Ako se promatra sa aspekta globalne održivosti poprilično je bitan, dok njegov utjecaj na lokalnoj razini i nije toliko bitan. Najmanje je bitan od četiri navedena podkriterija, ali nije zanemariv pogotovo kada se radi o serijskoj proizvodnji.



Slika 29. Težine podkriterija unutar kriterija troškovi

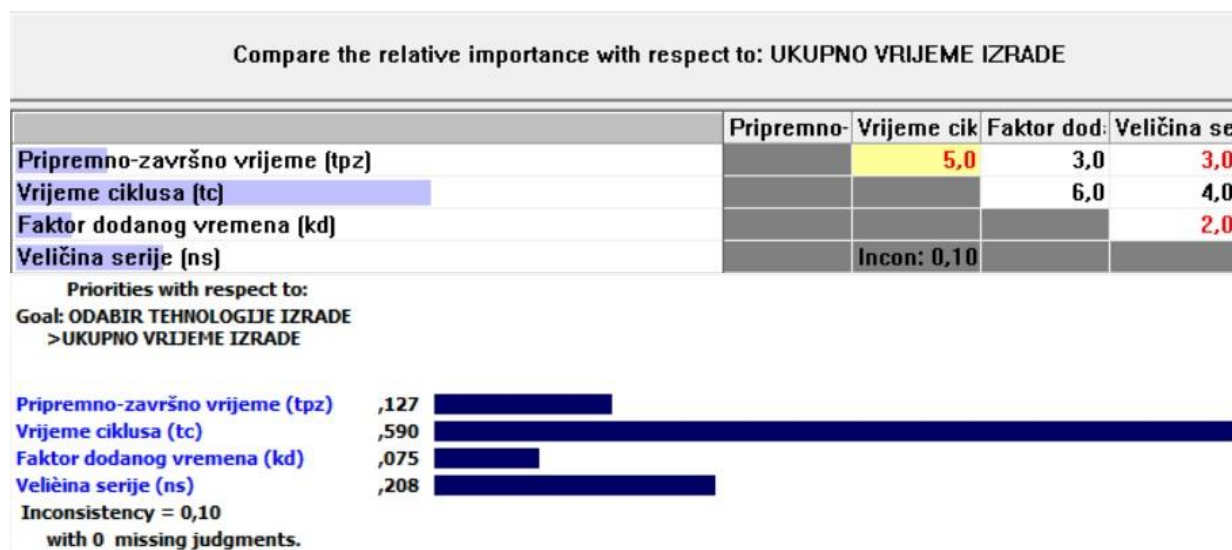
➤ UKUPNO VRIJEME IZRADE

Unutar ovog kriterija nalazi se četiri podkriterija kojima je trebalo dodijeliti težine. Podkriteriji su navedeni u nastavku, od najbitnijeg do najmanje bitnog.

- 1) Vrijeme ciklusa,
- 2) Veličina serije,
- 3) Pripremno-završno vrijeme t_{pz}
- 4) Faktor dodanog vremena t_D .

Nakon postavljanja težina dobiveni su rezultati prikazani na slici 32.

Vrijeme ciklusa spada u vrijeme izrade. Kod određivanja t_c u obzir se uzimaju vrijeme izvan ciklusa (stezanje obratka, primicanje cijevi za hlađenje, uključivanje pogodna i ostale slične faze) te vrijeme unutar ciklusa koje se dijeli na pomoćno vrijeme u ciklusu (pomicanje supporta, zakretanje držača noža itd.) te tehnološko vrijeme u ciklusu (strojno vrijeme, vrijeme za čijeg su trajanja oštrica i izradak u kontaktu). Formula po kojoj se računa ukupno vrijeme izrade prikazana je na stranici 60.



Slika 30. Težine podkriterija unutar kriterija vrijeme izrade

Vrijeme ciklusa, postavljeno je kao najvažnije jer se u serijskoj proizvodnji najveći dio vremena gubi upravo na taj segment proizvodnje. Nakon toga po težini slijedi veličina serije o kojoj uvelike može ovisiti odabir tehnologije. Na treće mjesto postavljeno je pripremno-završno vrijeme iz razloga što je ono fiksno i uvijek je otprilike istog trajanja kod izrade ili

sličnog ili istog proizvoda te proizvođač to uvijek može uračunati u konačno vrijeme isporuke. O vremenu izrade i veličini serije će ponajviše ovisiti konačno rok isporuke.

Kao četvrti kriterij naveden je faktor dodanog vremena koji kod klasičnih operacija produžuje vrijeme isporuke za čak 20% ili više, dok je kod aditivnih tehnologija to osjetno manje.

Faktor dodanog vremena uzima u obzir koeficijent zamora (utjecaj temperature zraka, utjecaj relativne vlažnosti zraka, utjecaj brzine strujanja zraka, utjecaj zagađenosti zraka), koeficijent djelovanja okoline (zamor zbog svladavanja tereta, zamor zbog položaja tijela pri radu, zamor zbog monotonije pri radu), te dopunski koeficijent (dodatak za propisani odmor, dodatak za fiziološke potrebe, dodatak za organizacijske gubitke). [39]

➤ PRODUKTIVNOST

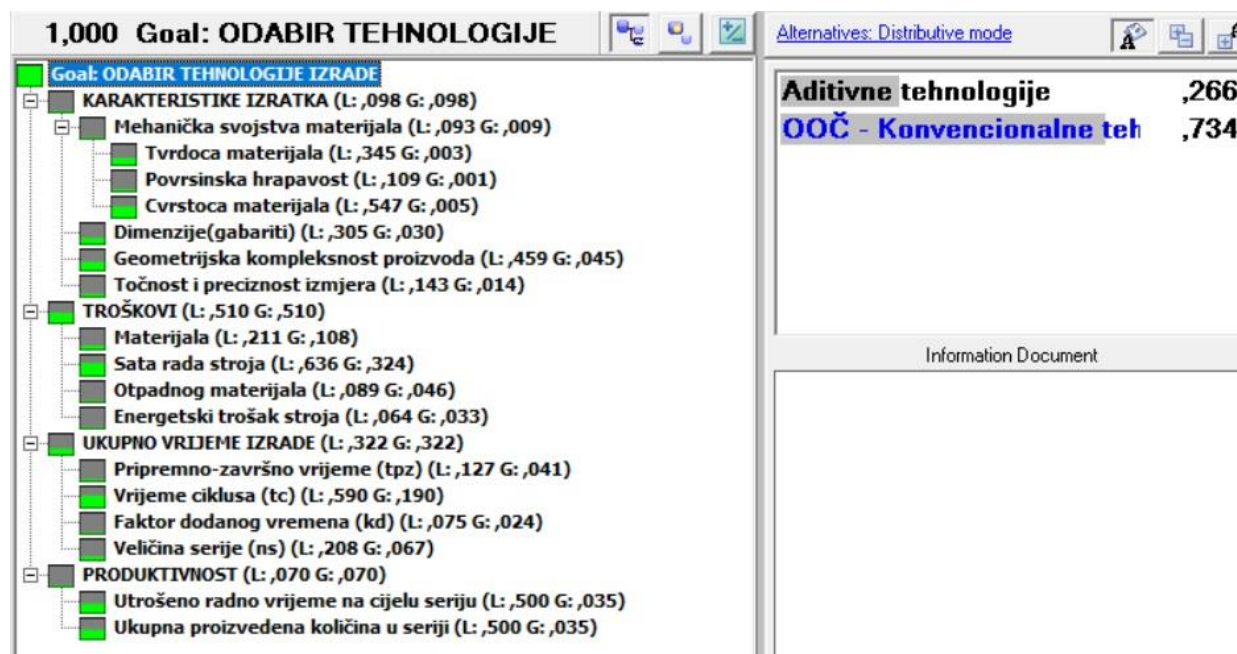
Produktivnost se dijeli na dva podkriterija: utrošeno radno vrijeme na cijelu seriju i ukupnu proizvedenu količinu u seriji. Odnos između ta dva kriterija ocijenjen je ocijenom 1, odnosno dodana im je jednaka težina. Kasnije u *what-if* analizi može se promatrati što bi se dogodilo kada bi se odnos tih dvaju podkriterija promijenio.

8.1.3. Procijena alternativa u odnosu na različite podkriterije

Dodavanje "težina" podkriterijima u odnosu na alternative vršilo se na temelju prikupljenih podataka prikazanih u tablici 7.5. Podaci su se međusobno uspoređivali te su se njihovi odnosi postavljali kao vrijednosti unutar Expert Choica. Podaci o vremenima izrade dodijelivani su po principu najkraćeg vremena, dok su troškovi dodavani na principu najnižih troškova. To bi značilo da su kraćim vremenima izrade, te nižim troškovima izrade bile dodijeljivanje veće vrijednosti unutar softvera. Na taj način dobili su se rezultati koji imaju smisla i koji dobro opisuju stvarno stanje. Što se tiče karakteristika materijala uzimane su one vrijednosti koje se dobiju sa dostavljenim materijalom, odnosno stanjem materijala odmah po isporuci (eng. *delivery condition*). Dodatnim obradama moguće je postići veću tvrdoću materijala i bolje klase hrapavosti, ali to se nije uzimalo u obzir. Razlog tomu je činjenica da se iz ovih „sirovih“ podataka o neobrađenom materijalu može procijeniti koliko će dodatne obrade trebati u kasnijim fazama tehnološkog procesa te se na taj način može dodijeliti "težina" svakom od tih podkriterija.

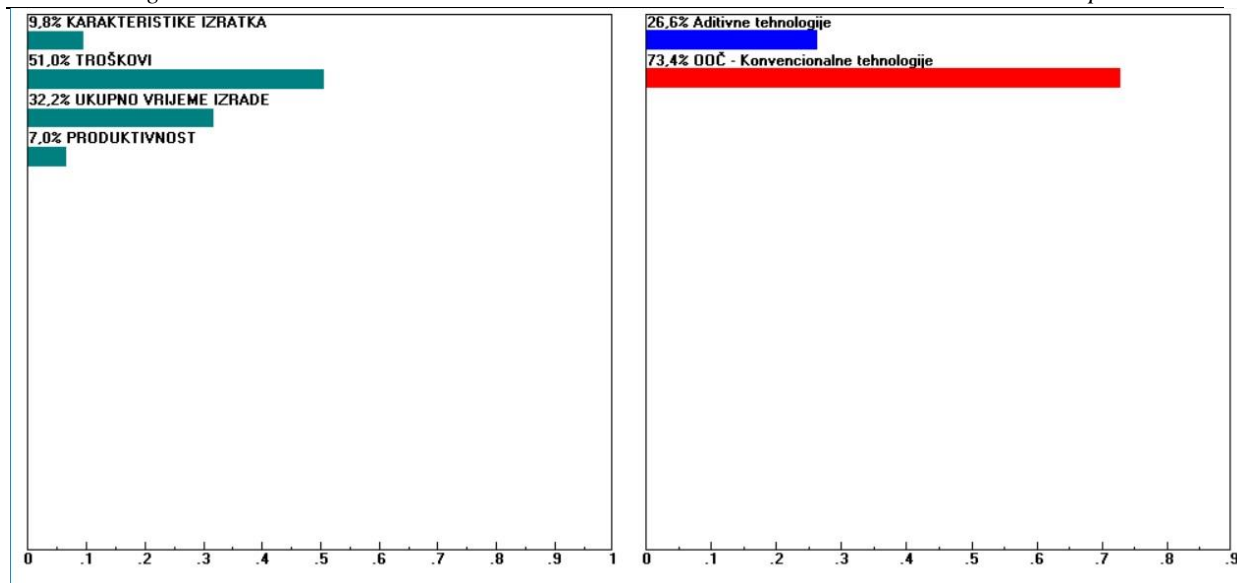
8.2. Rezultati i analiza rezultata

Nakon što su postavljene sve težine kriterija i podkriterija modificiranog stabla odlučivanja dobiveni su rezultati. Rezultati su prikazani na slici 33.



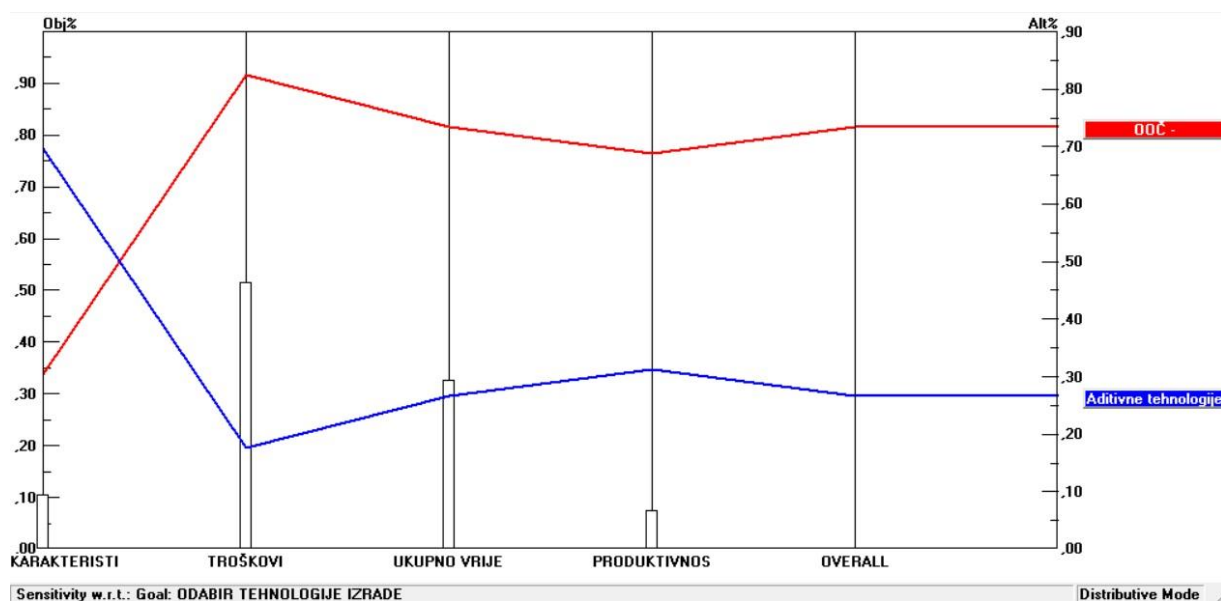
Slika 31. Prikaz dobivenih rezultata

Ako se pogledaju rezultati na slici 33. može se vidjeti da je kao najbolja alternativa proizlazi obrada klasičnim tehnologijama sa čak 73,4%. Jednako tako, pored svakog kriterija i podkriterija mogu se vidjeti oznake L i G. Oznaka L (eng. *local*) prikazuje utjecaj određenog kriterija unutar cilja, te utjecaj podkriterija unutar svakog kriterija. Oznaka G (eng. *global*) pokazuje koliko je utjecaj određenog kriterija u cijelom modelu, odnosno koliki je utjecaj svakog podkriterija unutar cijelog modela. Tako proizlazi da je utjecaj troškova na konačno rješenje 51%, utjecaj vremena izrade 32,2%, utjecaj karakteristika izratka 9,8% te utjecaj produktivnosti svega 7%. Ako se pogledaju podkriteriji može se vidjeti da najveći utjecaj, od svih podkriterija, ima trošak sata rada stroja sa čak 32,4%, iza njega slijede vrijeme ciklusa sa 17%, trošak materijala sa 10% pa sve do onih koji su gotovo zanemarivi poput površinske hrapavosti koja utječe sa svega 0,1% na konačnu odluku. Podaci o utjecaju određenog kriterija na konačnu odluku prikazan je u dynamic dijagramu na slici 34.



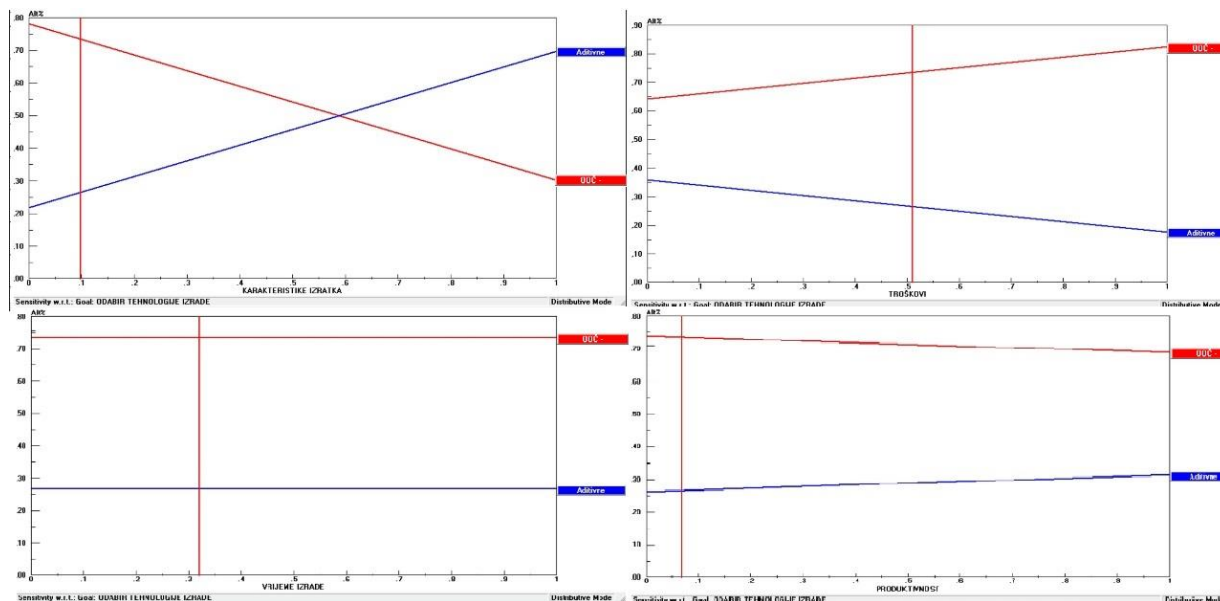
Slika 32. Utjecaj kriterija na odabir alternative

Performance dijagram omogućuje prikaz utjecaja pojedinih težina kriterija na trenutni i ukupni poredak alternativa. Trenutni poredak alternativa predstavlja promjenu prioriteta alternativa pod utjecajem "težine" jednog kriterija, a ukupni poredak alternativa predstavlja poredak alternativa pod utjecajem "težina" svih kriterija.

Slika 33. *Performance* dijagram AHP metode

Ako se pogleda dijagram na slici 35. vidljivo je da su s desne strane poredane alteranative prema prioritetu. Tako se može primijetiti kako su konvencionalne tehnologije puno iznad aditivnih tehnologija. Na lijevoj strani y – osi prikazane su težine pojedinih kriterija. Na x - osi grafa prikazani su kriteriji čiji stupci označavaju težine pojedinih kriterija, odnosno njihov

utjecaj na pojedinu alternativu. Moguće je primijetiti kako jedino kriterij karakteristike izratka utječe pozitivno na aditivne tehnologije dok su svi ostali kriteriji puno povoljniji za konvencionalne tehnologije. Takva situacija ne ulijeva pretjeranu nadu u isplativost proizvodnje zadanog zupčanika aditivnim tehnologijama.



Slika 34. Gradijent dijagrami za sva četiri kriterija

Ako se pogleda slika 36. na kojoj su prikazani gradijent dijagrami za sva četiri kriterija može se potvrditi gore navedena činjenica. Niti jedan od kriterija ne utječe pozitivno na odabir aditivne proizvodnje osim karakteristike izratka. Kada bi se značajno povećao utjecaj kriterija karakteristike izratka aditivna tehnologija bi počela imati smisla. Svi ostali kriterij mogu eventualno ublažiti razliku između prioriteta, ali niti jedan ju ne može ublažiti niti približno toliko da bi aditivne tehnologije uopće imalo smisla promatrati kao alternativu.

Ovakvi rezultati nisu niti malo iznenađujući. Ako se pogledaju cijene sata rada stroja te vremena izrade koja su prikupljena u fazi pripreme podataka te se analiziraju sa stajališta isplativosti proizvodnje očito je da izrada zadanog zupčanika aditivnim tehnologijama nema nikakvog smisla.

Gore navedenu činjenicu moguće je potvrditi i matematičkim računom.

Cijena izrade jednog proizvoda klasičnim strojevima bila bi 24,53€. Podaci su preuzeti iz tablica 7.4. i 7.5. Cijene su dane u €/h, a vrijeme izrade je preračunato u h.

$$C_{klasika} = C_{mat_{kg}} \cdot masa_{izratka} + C_{izradeOC} \cdot t_{izradeOC} + C_{CNCglodalica} \cdot t_{glodalica}$$

$$C_{klasika} = 4 \frac{eur}{kg} \cdot 2,5kg + 60 \frac{eur}{h} \cdot \frac{8,65min}{60} + 40 \frac{eur}{h} \cdot \frac{23,82min}{60} = 34,53eur$$

Cijena izrade jednog proizvoda aditivnom proizvodnjom bila bi 4115€. Podaci su iz tablica 7.4. i 7.5.

$$C_{3DP} = C_{mat_{kg}} \cdot masa_{izratka} + C_{radnog sata} \cdot t_{radnog sata}$$

$$C_{3DP} = 110 \frac{eur}{kg} \cdot 2,5kg + 120 \frac{eur}{h} \cdot 32h = 4115eur$$

Razlike su enormne i ne ostavljaju niti malo prostora za razmatranje. Činjenica je da za se 4115€, koliko košta aditivna proizvodnja, klasičnim tehnologijama može izraditi 119,17 zupčanika. Odnosno da se za 32h, koliko treba za izradu jednog zupčanika aditivnom proizvodnjom, klasičnim tehnologijama izradi se 59,13 zupčanika. Granični broj komada nije potrebno niti računati jer su i cijena i vrijeme izrade kod aditivnih tehnologija puno veće od onih kod klasičnih tehnologija te ne postoji točka u kojoj bi se krivulje aditivne i konvencionalne proizvodnje sijekle. U ovom slučaju komadna proizvodnja nema smisla, a o serijskoj ne treba niti razmišljati.

8.3. Potencijal aditivne proizvodnje – izrada šupljeg zupčanika

Zamislimo situaciju u kojoj naručitelj hitno treba specijalni zupčanik i spreman je platiti koliko god treba samo da na vrijeme dobije proizvod. Nije siguran kako zupčanik treba izgledati, ali ono što zna je da zupčanik mora biti od čelika i što je moguće manje mase te pri tome mora ostati siguran za uporabu. S takvim zahtjevima i CAD modelom sličnog zupčanika kupac je došao kod proizvođača te nada se uspješnoj suradnji.

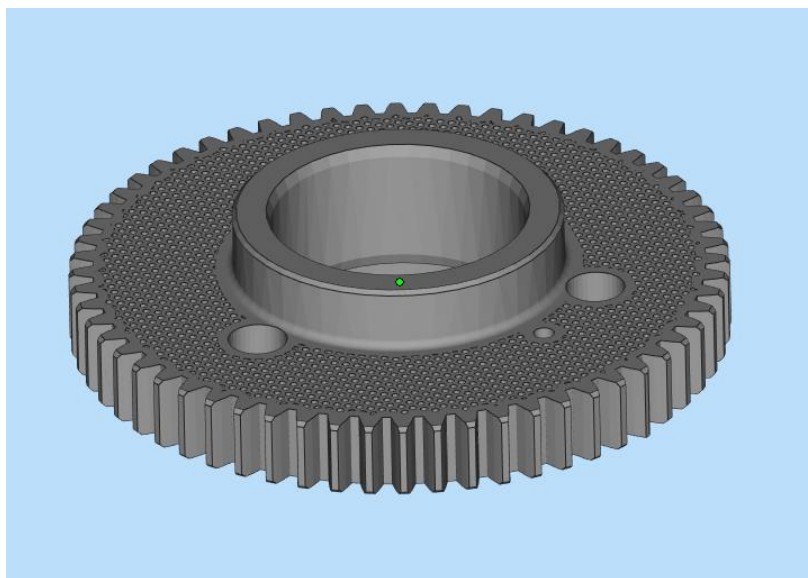
Ovaj problem dobro opisuje današnje stanje na tržištu. Kupci imaju sve teže i kompliciranije želje, njihovi zahtjevi često djeluju nezamislivo. Tu se otvara prilika novim tehnologijama te se otvaraju nova tržišta. Proizvođači koji mogu udovoljiti zahtjevima kupaca ostvaruju prevlast na tržištu te ostvaruju veću dobit.

Riješenje ovakvog i sličnih problema, u relativno kratkom periodu, mogu dati aditivne tehnologije. Kod klasičnih tehnologija smanjenje mase zupčanika moglo bi biti vrlo komplicirano, možda čak i nemoguće te bi proizvodnja jednog takavog zupčanika mogla proizvođaču donijeti puno muke.

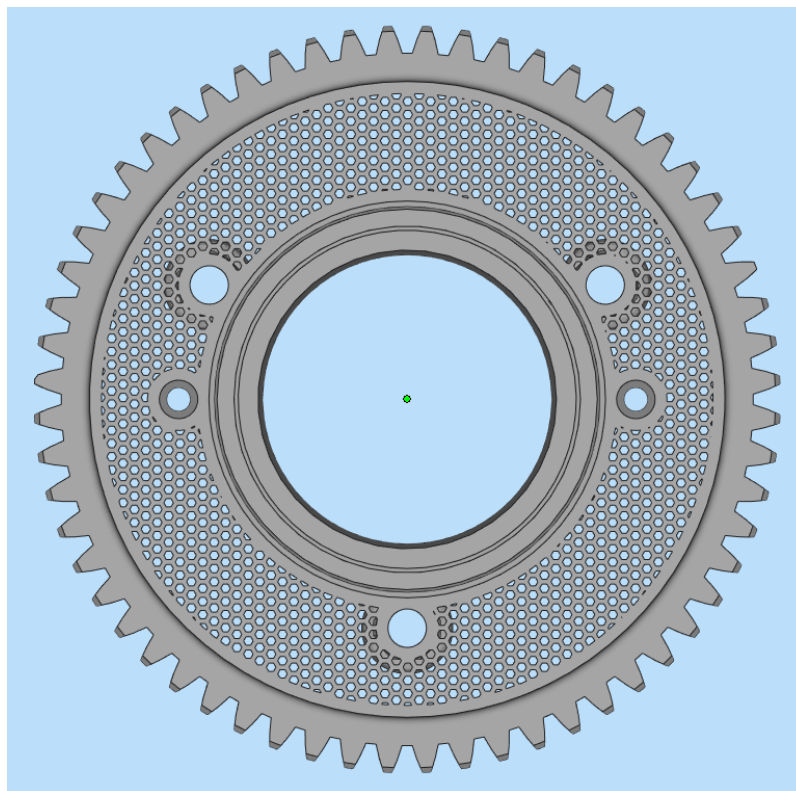
Tu nastupaju aditivne tehnologije. Zamislimo zupčanik za koji je rađena analiza u potpoglavlju 8.1., zupčanik od punog materijala. Njegova masa nakon 3D printanja jednaka je, ili gotovo jednaka, masi proizvoda koji se dobije izradom klasičnim tehnologijama. Količina otpadnog materijala je manja i to je jedina prednost u odnosu na konvencionalne tehnologije. Ali kada zamislimo situaciju da bi taj zupčanik trebao biti manje mase, jer tako kupac zahtijeva, onda se situacija poprilično mijenja. Aditivnim tehnologijama se na vrlo jednostavan i lak način dođe do rješenja problema. Naime, software-i poput Materialise Magics-a, koji služe za pripremanje CAD modela u step file koji odgovara 3D printeru, u vrlo kratkom periodu odrade smanjenje mase zupčanika pritom vodeći brigu da se ne oslabe ključni dijelovi izratka.

Materialise Magics predlaže izradu zupčanika sa puno malih šupljina. Za potrebe ovog rada takav zupčanik nazivati ćemo „šuplji“ zupčanik. Puno malih rupica može značajno utjecati na masu proizvoda, ali automatski i na vrijeme izrade. Postavlja se pitanje da li bi takav proizvod zadržao potrebne značajke, da li bi zadovoljavao proračune sigurnosti i da li bi kao takav bio adekvatan za upotrebu? U sklopu ovog rada pretpostaviti će se da su značajke gotovog proizvoda zadovoljavajuće. Moguće je da zupčanik ovog oblika u stvarnosti ne bi zadovoljio, ali uz adekvatnu konstrukcijsku doradu zasigurno bi se mogao dovesti na zadovoljavajuću razinu. Prilikom procjene značajki proizvoda trebalo bi provesti FEM analizu unutar programa Solidworks ili nekog drugog adekvatnog programa.

Na slikama 37. i 38. prikazan je zupčanik čiju izradu predlaže softver *Materialise Magic*. Vidljivo je da se izgled zupčanika promijenio, pojavile su se šupljine, ali se vodila briga da se ključni dijelovi proizvoda ne oslabe. Tako je vidljivo da je *Materialise Magic* ostavio deblji sloj materijala kod zubiju zupčanika te kod svih utora na zupčaniku. Ovakva konstrukcija zupčanika po potrebi se može mijenjati, ali za potrebe ovog rada smatrat će se zadovoljavajućom.



Slika 35. 3D model „šupljeg“ zupčanika



Slika 36. Tlocrt „šupljeg“ zupčanika

Kod ovakvih specijalnih zahtjeva kupaca težine kriterija se mijenjaju te mogu značajano utjecati na konačnu odluku. Vrijeme ciklusa „šupljeg“ zupčanika aditivnim tehnologijama skratilo se sa 32h na 18,5h, a da se pri tome pripremno-završno vrijeme nije značajno promijenilo. Troškovi izrade „šupljeg“ zupčanika konvencionalnim tehnologijama značajno bi porasli s obzirom da se geometrija izratka značajno zakomplicirala.

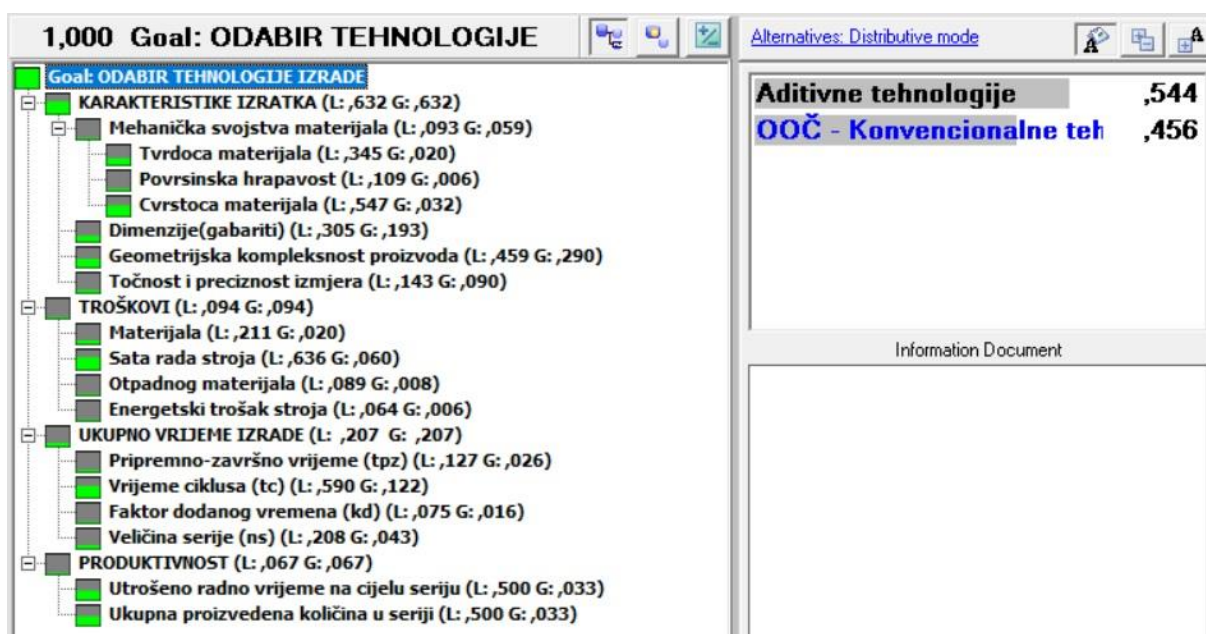
S obzirom na gore navedene činjenice dodijeljene su nove težine kriterijima. Kriteriji su navedeni od najznačajnijeg do najmanje značajnog.

- 1) Karakteristike izratka,
- 2) Ukupno vrijeme izrade,
- 3) Troškovi te,
- 4) Produktivnost.

Jednako tako, procjena alternativa prema podkriteriju vrijeme ciklusa se promijenila. Smanjio se utjecaj koji nose konvencionalne tehnologije u odnosu na aditivne tehnologije. Razlog tomu leži u činjenici da se vrijeme ciklusa aditivnih tehnologija skratilo, dok bi se vrijeme ciklusa kod konvencionalnih tehnologija produžilo.

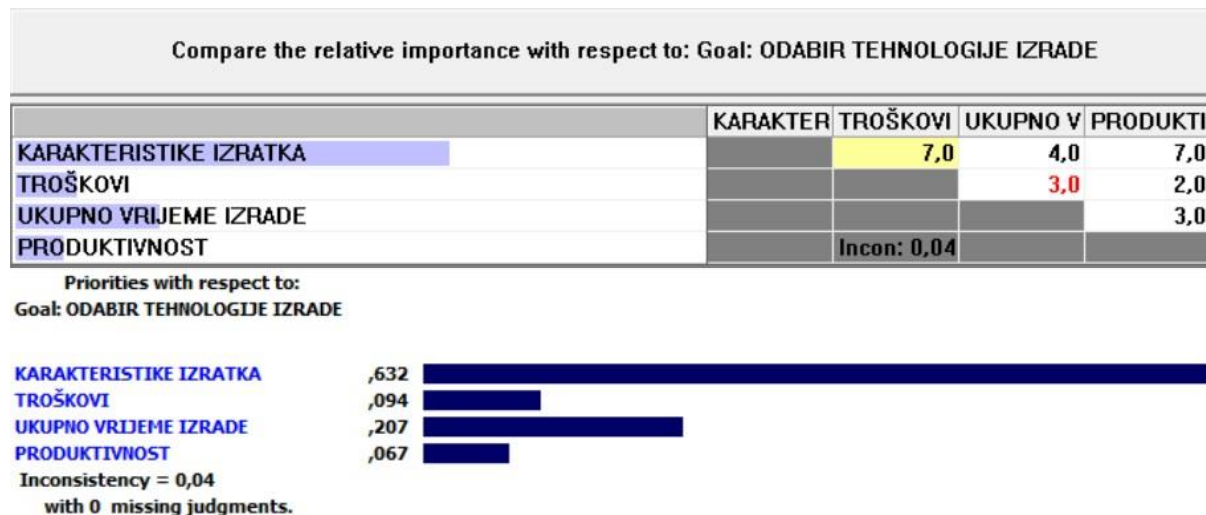
Sve ostale težine unutar stabla ostale su jednake kao za „puni“ zupčanik.

Nakon takvog postavljanja težina dobili su se rezultati prikazani na slici 39.



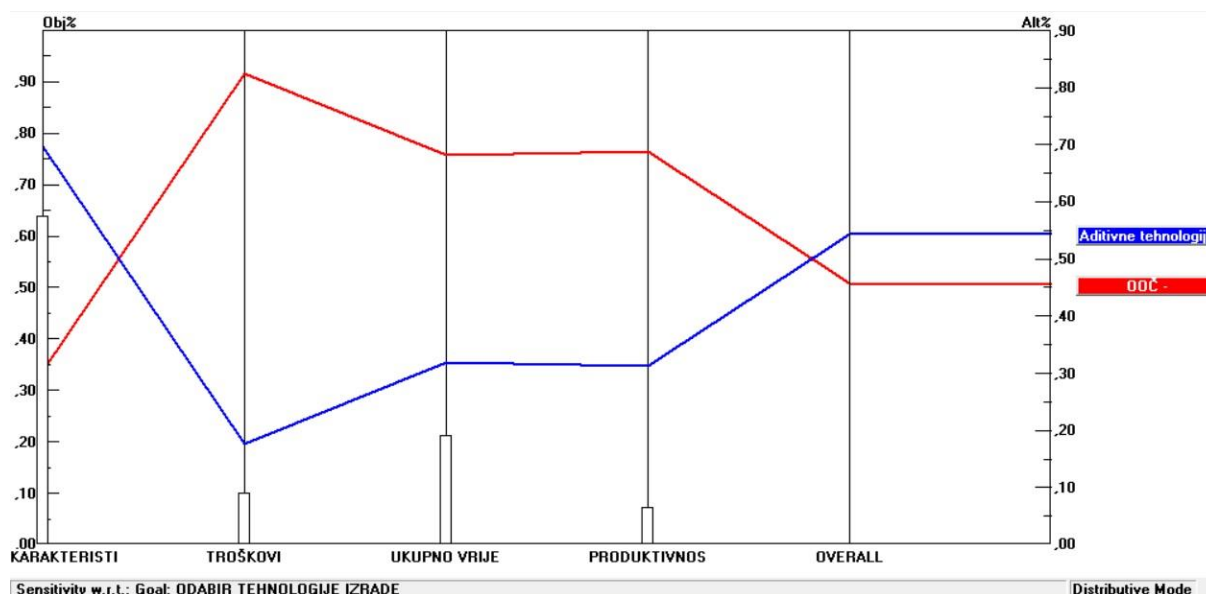
Slika 37. Rezultati analize odabira tehnologije izrade „šupljeg“ zupčanika

Kao što se može primijetiti na slici 39. nakon ovakvog postavljanja "težina" kao najbolja alternativa pokazuju se aditivne tehnologije. Ako se pogleda slika 40. vidljivo je da dva kupcu najvažnija kriterija imaju i najveće težine prilikom donošenja odluke. Konzistencija je zadovoljavajuća.



Slika 38. Težine kriterija kod izrade „šupljeg“ zupčanika

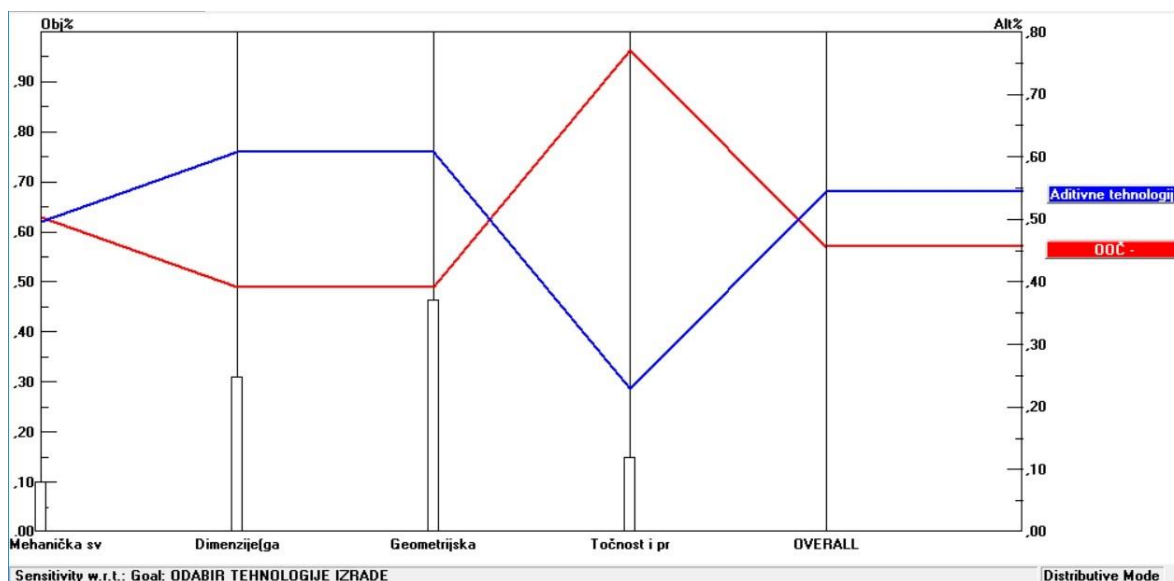
Kada se analizira *performance diagram* prikazan na slici 41. vidi se ista situacija kao za puni zupčanik. I dalje je jedini pozitivan kriterij za aditivne tehnologije kriterij karakteristike izratka. Vidljivo je da je u ovoj situaciji taj kriterij dovoljno „težak“ da prevlada izrada proizvoda aditivnim tehnologijama.



Slika 39. Performance dijagram za „šuplji“ zupčanik

Ako se posebno analizira kriterij karakteristike izratka te se promatra koji od podkriterija ima najveći utjecaj na konačnu odluku, mogu se primijetiti zanimljive stvari.

Dijagram je prikazan na slici 42.

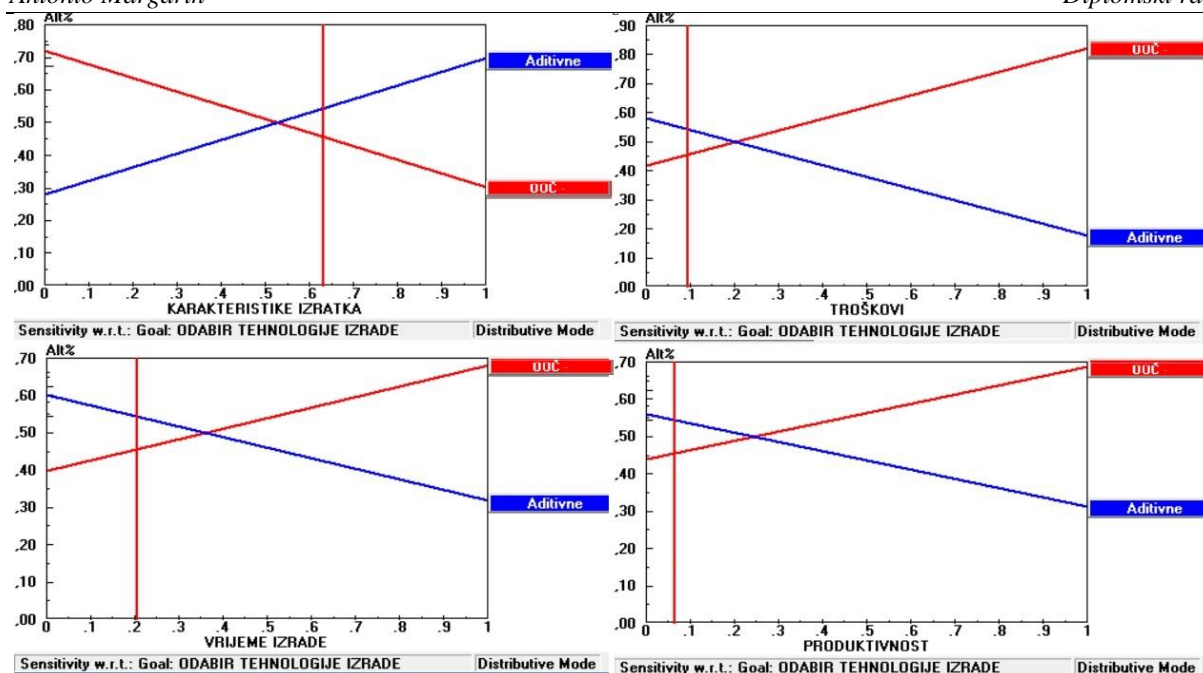


Slika 40. Težine podkriterija unutar kriterija karakteristike izratka

Iz slike 42 vidi se da aditivne tehnologije bolje odgovaraju za izradu specijalnih proizvoda.

Ako se pogledaju podkriteriji vidljivo je da tri od četiri podkriterija pozitivno utječu na odabir aditivne tehnologije kao tehnologije izrade, dok jedino točnost i preciznost izmjera idu u korist klasičnim tehnologijama. Takva situacija govori o tome da strojevi za 3D print još uvijek nisu dosegli kvalitete CNC strojeva.

Ono što je jednako tako zanimljivo pratiti su gradijent dijagrami prikazani na slici 43. Za razliku od izrade „punog“ zupčanika ovdje se može vidjeti kako se težina svakog od kriterija može promijeniti, a da se konačan izbor tehnologije ne promijeni. Moguće je da kupac poželi nižu cijenu proizvoda ili brže vrijeme izrade, a da se ne promijeni odluka da se proizvod izrađuje aditivnim tehnologijama.



Slika 41. Gradijent dijagrami prikazani za „šuplji“ zupčanik

Sve u svemu, „šuplji“ zupčanik izrađivao bi se aditivnom tehnologijom. Proizvodi takvog izgleda i takvih karakteristika u budućnosti bi se mogli sve češće izrađivati. Industrije poput automobilske često teže smanjenju ukupne mase vozila jer manja masa gotovo sigurno znači i manju potrošnju te mogućnosti ostvarivanja boljeg ubrzanja. Možda zupčanik treba hladiti uslijed prekomjernog zagrijavanja pa se rupice mogu iskoristiti za bolju cirkulaciju zraka i brže hlađenje. Općenito, razlozi izrade ovakvog zupčanika mogu biti razni. Ono što je bitno je da proizvođač uvijek mora moći proizvesti točno ono što kupac želi. Uz adekvatno znanje inženjera te adekvatnu primjenu aditivnih tehnologija kao tehnologije izrade čovjek može proizvesti što god želi. Postojanje mogućnosti da se izrađuje takav zupčanik, ali i drugi i njemu slični proizvodi, omogućuje inženjerima da izađu iz okvira te počnu razmišljati na neki potpuno drugačiji način.

8.4. Usporedba dobivenih rješenja

Zupčanik koji se promatrao unutar ovog rada uzet je zbog relativno kompleksnog izgleda te činjenice da ga je komplicirano izraditi čak i konvencionalnim metodama. Dodatni razlog zbog kojega je uzet u razmatranje je činjenica da je za njega postojao razrađen cijeli tehnološki proces izrade. U samom startu postojala je sumnja da bi rezultati mogli biti na strani konvencionalnih tehnologija. Prije svega zbog činjenice da je zupčanik relativno velikih dimenzija, kao i činjenice da su aditivne tehnologije nove tehnologije te se prepostavljalo da bi cijene materijala i vremena izrade mogli biti veći nego kod aditivnih tehnologija.

Nakon prikupljanja podataka, postavljanja stabla te provođenja metode odrađena je analiza za „puni“ zupčanik iz koje je vidljivo da su konvencionalne tehnologije još uvijek u prednosti u odnosu na aditivne. Razlike u cijenama sata rada i cijenama materijala prevelike su te poprilično utječu na konačan rezultat. Jednako tako, vremena izrade su neusporediva. Za izradu samo jednog „punog“ zupčanika aditivnim tehnologijama potrebno je gotovo šesdeset puta više vremena nego za izradu tog istog zupčanika konvencionalnim metodama. Ako se pogledaju samo ta dva kriterija, cijena i vrijeme, vidljivo je da aditivne tehnologije još uvijek nemaju smisla kod izrade proizvoda jednostavnog oblika ili kod izrade proizvoda za koje već postoji uhodana serijska proizvodnja.

Ono gdje aditivne tehnologije imaju šansu su izrade proizvoda specifičnog oblika. Ako predmet iz određenog razloga treba biti „šupalj“, ako se unutar izratka moraju nalaziti komplicirani kanail nepravilnog oblika koji bi služili za hlađenje izratka ili jednostavno izradak mora biti manje mase, tu nastupaju aditivne tehnologije. One omogućuju izgradnju najkompleksnijh izradaka te na taj način konstruktoru omogućuju konstruiranje gotovo neograničenog broja različitih varijanti jednog proizvoda.

Jednako tako, aditivne tehnologije mogu se koristiti kod reparacije proizvoda. Omogućuju dodavanje materijala na postojeći proizvod te bi se na taj način mogli reparirati zubi zupčanika.

Ono što se može reći je činjenica da uspoređivanje aditivnih i konvencionalnih metoda, u ovom trenu, gotovo da nema smisla. Konvencionalne metode su brze, ali ograničene po pitanju izgleda proizvoda, dok su aditivne tehnologije spore ali neograničenih mogućnosti što se tiče izgleda proizvoda.

Ono što bi se moglo pratiti, a moglo bi dati zanimljivije rezultate, je izrada kompliciranog proizvoda od plastike. Izrada takvog proizvod konvencionalnim metodama iziskivala bi poprilične troškove prilikom izrade specijalnih alata te bi tu aditivne tehnologije mogle imati šanse. Pogotovo kada bi se izrađivao samo jedan proizvod ili neka manja serija proizvoda. Aditivne tehnologije ne iziskuju specijalne alate za izradu te bi s te strane bile u prednosti u odnosu na konvencionalne metode.

Osim plastike, izrada proizvoda od lima bi također mogla biti interesantna za promatranje. Alati za izradu lima su veoma skupi te bi tu aditivne tehnologije mogle biti u prednosti ukoliko bi materijali za printanje mogli odgovoriti zahtjevima proizvodnje.

Zadani zupčanik nije proizvod koji bi zahtijevao izradu specijalnih alata kod izrade konvencionalnim metodama te s te strane možda nije najzahvalniji proizvod za usporedbu odabira tehnologije.

Također, bilo bi interesantno pratiti kakvi bi se rezultati dobili kada bi se izrađivao „puni“ zupčanik jednakog izgleda, ali manjih dimenzija. U tom slučaju u jednom printanju moglo bi se printati više zupčanika te bi to rezultiralo smanjenjem troškova komadu, a i ukupno vrijeme izrade komada bi se smanjilo te bi na taj način aditivne tehnologije mogle biti konkurentnije. Kada bi se promatrala izrada „šupljeg“ zupčanika manjih dimenzija, vjerojatno je da bi rezultati bili uvljerljivo na strani aditivne proizvodnje jer bi proizvodnja takvih zupčanika konvencionalnim metodama bila puno kompliciranija i sporija baš zbog kompleksnosti izgleda proizvoda. Samim time, troškovi i vrijeme izrade bi se povećavali te bi konvencionalne metode mogle biti u lošijem položaju od aditivne proizvodnje. To ne mora nužno značiti da je konačni proizvod izrađen aditivnom proizvodnjom jeftiniji, ali definitivno može značiti da zbog utjecaja ostalih kriterija unutar stabla prednost može otići na stranu aditivnih tehnologija.

Prednosti i mane kod izrade zupčanika konvencionalnim i aditivnim tehnologijama dane su u tablici 8.1.

Tablica 8.1 Prednosti i mane kod izrade zupčanika objema tehnologijama

	Prednosti	Mane
Konvencionalne tehnologije	<ul style="list-style-type: none"> - brže vrijeme izrade – ponajprije tehnološko vrijeme - kraće pripremno-završno vrijeme - manji troškovi - jeftiniji strojevi - postoje već uhodani procesi izrade - relativno jednostavno korištenje strojeva 	<ul style="list-style-type: none"> - ograničena mogućnost proizvodnje kompleksnih proizvoda - skupe izrada proizvoda kompleksnih oblika - za izradu jednog zupčanika potrebno više različitih strojeva – moguće pojavljivanje problema zauzetosti i kapaciteta strojeva - moguća potreba za specijalnim alatima - trošenje alata i oštrica

	Prednosti	Mane
Aditivne tehnologije	<ul style="list-style-type: none"> - mogućnost printanja geometrijski kompleksnih proizvoda - omogućavaju neograničenu maštu prilikom konstruiranja proizvoda - omogućavanje smanjenja mase izratka - uštede na materijalu - sve operacije odrađuju se na jednom stroju - pripremno-završno vrijeme je dugo samo kod izrade prve serije, kasnije se smanjuje – postoji baza podataka, stl datoteke se samo prebace u printer - nepostojanje potrebe za specijalnim alatima 	<ul style="list-style-type: none"> - ograničeni materijali - visoka cijena materijala/kg - visoka cijena sata rada stroja - slaba produktivnost - neisplativost izrade većih serija - pripremno-završno vrijeme relativno dugo - faze čišćenja potrebne nakon izrade svakog proizvoda - potrebno dugo i skupo školovanje zaposlenika

Općenito, na kraju usporedbe dobivenih rezultata može se reći da ovog trena aditivne tehnologije imaju smisla za pojedinačnu proizvodnju ili eventualno manje serije, odnosno kod izrade specijanih proizvoda kompleksnog geometrijskog oblika. Za ostale proizvode veća je vjerojatnost da će konvencionalne tehnologije biti isplativije, ponajprije zbog manje cijene izrade te kraćih vremena. Visoka vremena izrade rezultiraju slabom produktivnošću te je moguće da iz toga proizlazi i visoka cijena izrade. Kako bi se čim prije pokrili investicijski troškovi te troškovi proizvodnje nužno je više naplatiti uslugu te na taj način osigurati veću dobit odnosno brži povrat investicije.

9. ZAKLJUČAK

Zadovoljstvo kupca najvažniji je indikator uspješnosti za svakog proizvođača. Proizvodnja onoga što kupac želi je nešto što proizvođaču garantira opstanak na tržištu.

Pojavom novih tehnologija sve je teže odlučiti što je i kada isplativije izrađivati te na koji je način bolje to izrađivati. Kako bi se olakšalo donošenje odluke o odabiru tehnologije izrade unutar ovog rada formirana su dva stabla odlučivanja. Teorijsko stablo razrađeno u ovom radu uzelo je u obzir velik broj različitih kriterija i podkriterija, a sve kako bi se mogla donijeti čim kvalitetnija odluka. Terijsko stablo smatra se bazom iz koje bi se moglo preciznije i adekvatnije razraditi stablo odlučivanja koje bi bilo primijenjivo i u privredi.

Za potrebe ovog rada korišteno je modificirano stablo odlučivanja koje je manjeg raspona od teorijskog, ali su svi najbitniji kriteriji uzeti u obzir. Nakon prikupljanja i obrade podataka, odrađen je odabir tehnologije izrade pomoću softvera Expert Choice te su dobiveni rezultati. Slobodno se može ustvrditi da je Expert Choice, ukoliko su podaci prikupljeni i obrađeni na adekvatan način, snažan alat te odlična podrška donošenju odluka. Mogućnosti koje Expert Choice pruža su višestruke. Odrađivanje what-if analiza te promatranje što se događa sa konačnom odlukom ukoliko se „težine“ kriterija i podkriterija promijene mogu biti od velike pomoći donositelju odluke. Ono što je vrlo važno je da donositelj odluke poznaje materiju problema o kojem odlučuje te da na pravi način zna tumačiti dobivena rješenja jer ga u suprotnom Expert Choice može nepotrebno zbuniti te usmjeriti na krivi put.

Kako god bilo, čovjek je taj koji donosi odluku. Niti jedan softver ili alat ne mogu zamijeniti osjećaj i iskustvo koje posjeduje čovjek te se to ne smije nikada zaboraviti. Stoga, od izrazite je važnosti da donositelj odluke konstatno radi na sebi, uči i skuplja iskustvo, a sve kako bi njegove procjene i rješenja problema bila čim bolja, kako za njega, tako i za sve ljude koji o toj odluci ovise.

LITERATURA

- [1] <http://imef.hr/reinzenjering-poslovnih-procesa/>
(pristupljeno 12.3.2018.)
- [2] <http://searchcio.techtarget.com/definition/business-process-reengineering>
(pristupljeno 12.3.2018.)
- [3] <https://kissflow.com/bpm/business-process-reengineering/>
(pristupljeno 12.3.2018.)
- [4] <https://hbr.org/1990/07/reengineering-work-dont-automate-obliterate>
(pristupljeno 12.3.2018.)
- [5] Damir Godec i Mladen Šercer: Aditivna proizvodnja, udžbenik Sveučilišta u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, lipanj 2015.
- [6] History of additive manufacturing by Terry Wohlers and Tim Gornet, Wohlers Report 2016
- [7] <http://www.3ders.org/articles/20161230-3d-printing-in-2016-year-in-review.html>
(pristupljeno 23.5.2018.)
- [8] Dr.sc.Ana Pilipović, powerpoint prezentacija *Osnovni pojmovi, definicije i podjela postupaka aditivne proizvodnje i prototipova*, FSB, Zagreb, 2013.
- [9] Dr. sc. Damir Godec, prof. dr. sc. Mladen Šercer : *Additive Technologies for SMEs, Aditivne tehnologije za mala i srednja poduzeća. Fakultet strojarstva i brodogradnje, 28.05.2013. godina, Power point prezentacija*
- [10] A. Norton: Utilising Rapid Product Development and Late Customisation Methodologies within Manufacturing SMEs,
http://www.lboro.ac.uk/microsites/mechman/research/ipm-ktn/pdf/Technology_review/rapid-production-development-and-late-customisation-for-manufacturing-smes.pdf, otvoreno: 12. veljače 2018.
- [11] HO CIRED, „Primjena analitičkog hijerarhijskog procesa u određivanju prioriteta investicijskih ulaganja uz pomoć programskog paketa Expert Choice“,
<http://www.ho-cired.hr/referati/SO5-05.pdf>, otvoreno 14.2.2018.
- [12] Decision Support Systems Resources. <http://dssresources.com/> (6.1.2015.)
- [13] Maja Trstenjak, Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [14] Power D.J., „A Brief History of Decision Support Systems“,

- <http://dssresources.com/history/dsshistory.html>
- [15] Stjepan Lojen, Podrška odlučivanju kod odabira primarnog procesa u projektiranju tehnološkog procesa, završni zadatak, FSB Zagreb, 2015., Zagreb
- [16] Power D.J., „Decision Support Basics“, Business Expert Press, New York, 2009.
- [17] Nestić S., Stefanović M., „Komponente i klasifikacija DSS-Koncepti WEB baziranih DSS sistema“, <http://www.cqm.rs/2011/FQ2011/pdf/38/41.pdf>
- [18] Multi-criteria analysis: a manual, Department for Communities and Local Government London, 2009.
- [19] Dinko Dujmić, diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2014.
- [20] Xu, L., Yang, J.: Introduction to Multi-Criteria Decision Making and the Evidential Reasoning Approach, University of Manchester Institute of Science and Technology, 2001.
- [21] Aruldoss, M., Lakshmi, M., T., Venkatesan, P., V.: A Survey on Multi Criteria Decision Making Methods and Its Applications, American Journal of Information Systems, Vol. 1, No. 1, Science and Education Publishing, 2013.
- [22] Aleksandar Milković, ELECTRE, seminarski rad, Prirodoslovno-matematički fakultet-matematički odsjek, Zagreb, 2010.
- [23] Ivan Mudrinić, diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [24] Adis Puška, Rangiranje čimbenika za odabir dobavljača putem TOPSIS metode, Oeconomica Jadertina, Brčko, BiH, 2015
- [25] Milan Paunović, Analiza mogućnosti primene PROMETHEE metode u odlučivanju, Fakultet tehničkih nauka, Čačal, 2015.
- [26] Nina Begičević, Višekriterijski modeli odlučivanja u strateškom planiranju uvođenja e-učenja, doktorska disertacija, Varaždin, 2008.
- [27] Doc. dr. sc. Dragutin Lisjak, *Primjena AHP metode kao alata za optimalni izbor opreme*, Održavanje u sustavu gospodarenja fizičkom imovinom, Power point prezentacija, Zagreb, 2011. godina
Lisjak, Dragutin. Predavanje, Održavanje. Održavanje. Fakultet strojarstva i brodogradnje. Zagreb, studeni 2015.,
- [28] Holjevac, N., Kuzle, I., Zidar, M., Modrovčić, M.: Razvoj modela analitičkog hijerarhijskog procesa i njegovo korištenje pri donošenju odluke o prelasku na 20 KV pogonski napon. Trogir, svibanj 2014.,
- [29] Damjanović, D. Primena AHP metode na selekciju i evaluaciju dobavljača. Univerzitet

- Singidunum, Beograd, 2013., <http://www.singipedia.singidunum.ac.rs/content/3371-Primena-AHP-metode-na-selekciju-i-evaluaciju-dobavlja%C4%8Da> ,
(pristupljeno 14.2.2018.)
- [30] <https://expertchoice.com> (pristupljeno 21.02.2018.godine)
- [31] Briš Alić M., „Primjena AHP metode i Expert Choice softvera u procesu donošenja odluke“, Ekonomski fakultet u Osijeku, Osijek, 2013.
- [32] Krešimir Jergović, završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1995.
- [33] <https://www.stratasysdirect.com/resources/design-guidelines/direct-metal-laser-sintering>
(pristupljeno 23.6.2018.)
- [34] <https://www.3trpd.co.uk/dmls/dmls-materials.htm>
(pristupljeno 23.6.2018.)
- [35] <https://i.materialise.com/blog/en/direct-metal-laser-sintering-dmls/>
(pristupljeno 23.6.2018.)
- [36] <http://amtech3d.com/dmls-component/>
(pristupljeno 23.6.2018.)
- [37] <http://www.toolingandproduction.com/cms/tap/opens/articleview.php?nid=3&bid=603&aid=2570&eid=Website%20Visitor&lk=1&sr=R&tp=Y>
(pristupljeno 23.6.2018.)
- [38] <http://www.marsi.at>
(pristupljeno 23.6.2018.)
- [39] Powerpoint prezentacija iz kolegija prof dr.sc Predrag Ćosić, „Projektiranje tehnoloških procesa“, Zagreb, 2016.
- [40] Bojan Kraut, Strojarski priručnik, Sajema, Zagreb, 2009.
- [41] <http://www.steel-guide.eu/product/5115>
(pristupljeno 23.6.2018.)
- [42] https://www.fsb.unizg.hr/elemstroj/pdf/pmf/osnove_strojarstva/meh_svojstva_celika.pdf
(pristupljeno 23.6.2018.)
- [43] http://www.marsi.at/images/mojeSlike/files/puporabe/EOS-MaragingSteel-MS1_400W.pdf
(pristupljeno 23.6. 2018.)
- [44] https://www.eos.info/systems_solutions/metal/systems_equipment/eosint_m280ž
(pristupljeno 23.6.2018.)

- [45] <https://www.liebherr.com/shared/media/gear-technology-and-automation/broschures/gear-cutting-machines/liebherr-hobbing-machines-lc80-180.pdf>
(pristupljeno 23.6.2018.)
- [46] http://int.haascnc.com/mt_spec1.asp?intLanguageCode=1033&id=DS-30Y&webID=DUAL_SPINDLE_LATHE
(pristupljeno 23.6. 2018.)

PRILOZI

- I. CD-R disc
- II. Radionički crtež zupčanika

PRILOG II – radionički crtež zupčanika

